

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE E CURVATURA DO TERRENO NA SUSCETIBILIDADE A  
ESCORREGAMENTOS EM NÚCLEOS HABITACIONAIS DA RMSP**

Laine Melo de Carvalho

**Orientador: Carlos Henrique Grohmann de Carvalho (IEE - USP)**

Coorientador: Fernando Machado Alves (REGEA)

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA**  
(TF - 23/35)

**São Paulo**  
**2023**

Dedico este trabalho a Luiz e Cleusa, meus pilares nesta vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Luiz e Cleusa, por sempre terem me incentivado a estudar, me darem suporte para alcançar meus objetivos, atenção, carinho e amor, todo o meu esforço é e sempre será pensando em vocês. A minha irmã Luilde, minha melhor amiga, pelo suporte, cuidado e por ter trilhado o caminho junto comigo por todos esses anos

A Regea e ao Instituto Geológico por terem permitido o uso e aplicação do mapeamento realizado em consórcio. A toda equipe Regea, por todos os conhecimentos compartilhados e experiências vividas.

Ao meu orientador Geólogo Carlos Henrique Grohmann (Guano), pela paciência, atenção e disponibilidade para conversar. Ao meu orientador o Geólogo Fernando Machado Alves (Lampião), por todos os momentos que parou todas as tarefas que estava realizando para tirar minhas dúvidas, pelos ensinamentos e risadas. Ao Geólogo Adalberto Aurélio de Azevedo (Barba), as preleções e as histórias.

A Mutano e Futrika, pelas experiências juntas ao longo desses seis anos de graduação, sempre apoiando uma à outra. A minha amiga Rafaela, por me alegrar todos os dias no trabalho e na vida. A minha amiga Carina, me aproximar de você foi umas das coisas boas de 2022. Ao João, que sempre me ajudou quando eu precisei de ajuda profissional e sentimental. A Camila, pela calma, alegria que me traz e por acreditar mais em mim que eu mesma. A Julinha e Catarina pela amizade. Aos amigos que fiz durante a graduação, todos aqueles que me ajudaram e a turma 61.

## RESUMO

Deslizamentos de terra são desastres naturais que provocam riscos à vida, tendo nos últimos 35 anos contabilizado milhares de mortes, além de danos materiais causados aos seres humanos. Visando atenuar este número faz-se necessário entender os mecanismos responsáveis das ocorrências. Neste projeto, a partir de um mapeamento de risco a suscetibilidade a escorregamentos, determinou-se a influência e o comportamento da declividade e da curvatura de terrenos em movimentos de massa. Realizou-se uma revisão bibliográfica, primeiramente dos métodos anteriormente utilizados para determinação da influência de diferentes variáveis à sustentabilidade ao risco de escorregamentos, de ferramentas a serem utilizadas para confecção de mapas das variáveis analisadas e dos conceitos básicos de movimentos de massa, suscetibilidade, declividade e curvatura do terreno. Para a determinação da influência da declividade e curvatura vertical, foram utilizados setores de risco mapeados sobrepostos a modelos digitais, de elevação (MDE) e superfície (MDS), com diferentes resoluções. O trabalho em questão apresenta dados qualitativos sobre a influência da declividade, no qual identificou-se que declividades abaixo de 5° não apresentam influência na suscetibilidade a escorregamentos. Foram sugeridas quebras, onde valores entre 23° e 26° podem estar relacionados a riscos altos e declividades acima de 26° sugerem riscos muito altos (R4). Neste mesmo sentido, determinou-se uma correlação entre declividades abaixo de 17° como uma classe de baixa propensão ao risco. Ademais, foram explorados meios de se determinar valores de classificação de curvatura vertical retilínea, no qual os valores obtidos não foram acurados, exemplificando a dificuldade e necessidade de outros métodos para a compartimentação. Realizou-se também, com os dados de curvatura vertical mínima, uma correlação do índice de curvatura vertical menor com o aumento da suscetibilidade a escorregamentos. Em relação aos dados de curvatura vertical máxima, o índice de curvatura maior se correlaciona com o aumento da suscetibilidade a escorregamentos.

**Palavras-chaves:** Setores de risco, Mauá, Francisco Morato, análise qualitativa, análise estatística, movimentos de massa, intervalos de confiança.

## ABSTRACT

Landslides are life-threatening natural disasters and over the last 35 years have claimed thousands of lives, as well as causing material damage to human beings. To mitigate this number, it is necessary to understand the responsible mechanisms for these occurrences. In this project, based on a risk mapping of landslide susceptibility, the influence and behavior of slope and terrain curvature in mass movements were determined. A literature review was conducted, initially focusing on methods previously used to assess the influence of different variables on landslide risk sustainability, the tools for creating maps of the variables analyzed, and basic concepts of mass movements, susceptibility, slope, and terrain curvature. To determine the influence of slope and vertical curvature, mapped risk sectors were overlaid on digital elevation (DEM) and surface (DSM) models with varying resolutions. The study presents qualitative data on slope influence, revealing that slopes below  $5^{\circ}$  do not affect landslide susceptibility. Breakpoints were suggested, where values between  $23^{\circ}$  and  $26^{\circ}$  may be associated with high risks, and slopes above  $26^{\circ}$  indicate very high risks (R4). Similarly, a correlation was established between slopes below  $17^{\circ}$  and a low-risk propensity class. In addition, methods for determining values of straight-line vertical curvature classification were explored, in which the values obtained were not accurate, illustrating the difficulty and necessity of other methods for compartmentalization. Correlations were also made with minimum vertical curvature data, linking the lower vertical curvature index to increased landslide susceptibility. Regarding maximum vertical curvature data, the higher curvature index correlated with increased susceptibility to landslides.

**Keywords:** Risk sectors, Mauá, Francisco Morato, qualitative analysis, statistical analysis, mass movements, confidence intervals.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. METAS E OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
2.1 Objetivos gerais .....	2
2.2 Objetivos específicos .....	2
<b>3. TRABALHOS PRÉVIOS .....</b>	<b>3</b>
3.1. Geomorfologia do estado de São Paulo .....	3
3.2. Contextualização geológica das áreas .....	4
3.3. Processos de movimento de massa e as ferramentas de avaliação de riscos ..	6
3.4. Suscetibilidade de escorregamentos .....	9
3.5. Declividade como parâmetro morfométrico .....	10
3.6. Curvatura do terreno como parâmetro morfométrico .....	11
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
4.1. Banco de dados .....	13
4.2. Modelo Digital de Elevação (MDE) .....	18
4.3. Declividade .....	18
4.4. Curvatura vertical do terreno .....	19
<b>5. RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>20</b>
5.1. Declividade .....	21
5.2. Curvatura vertical do terreno .....	31
<b>6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
6.1. Interpretação e discussão dos resultados de declividade .....	40
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desastres são desencadeados por eventos adversos, que podem ser de origem natural ou induzidos por ação humana, afetando um ecossistema e resultando em danos tanto para seres humanos como para o meio ambiente, acarretando perdas econômicas e sociais (Castro,1998). Dentre os processos geodinâmicos associados a desastres naturais, podemos citar os movimentos gravitacionais de massa, que são classificados como qualquer movimento coletivo de rochas e/ou solo decorrentes da ação gravitacional, podendo ser potencializado pela presença de água (Castro, 1998). São recorrentes as notícias de acidentes catastróficos causados por esse fenômeno em períodos chuvosos, como a presenciada no início de 2023 na região do litoral norte do Estado de São Paulo.

Segundo Macedo & Sandre (2022), desde 1988 até junho de 2022 somam mais de 4 mil mortes por deslizamentos de terra no Brasil, com uma média anual de 118 vítimas por ano. De acordo com os autores, dois anos se destacaram entre os dados, o ano de 2011, com um total 969 mortes por deslizamentos, e o ano de 2022, que mesmo com dados parciais, marcava cerca de 443 mortes por deslizamento até o mês de junho. Segundo a Defesa Civil do Estado de São Paulo, desde o início do ano de 2023, foram contabilizadas 64 vítimas só no litoral norte do estado de São Paulo.

Para evitar o aumento desses números, é fundamental que existam projetos de prevenção de desastres, para isso são necessários estudos de suscetibilidade a deslizamentos. Segundo Guzzetti et al. (2012), um dos primeiros passos na análise de suscetibilidade a escorregamentos é a construção de inventários, na forma de compilados de dados históricos de escorregamentos da região de estudo, que podem ser baseados em diversas fontes, como os meios de comunicação, registros oficiais e dados de sensoriamento remoto (fotografias aéreas, imagens de satélite etc.). Por vezes esse cadastro pode contar com informações melhor tratadas, representadas por mapeamento em escala de detalhe, que comumente compõe os PMRR (Plano Municipal de Redução de Riscos), estes mapeamentos contam com algumas metodologias amplamente aplicadas no Brasil. Ainda como fonte de informações nos mapas de suscetibilidade a escorregamentos, cita-se a correlação de parâmetros do meio físico com a ocorrência de desastres desse tipo, nesse ponto pode ser citado, além da declividade e curvatura vertical do terreno, alvo desta monografia, também outros dados morfométricos, como amplitude, curvatura horizontal do terreno, orientação de vertentes, densidade de lineamentos, entre outras dezenas de parâmetros, adequadamente apresentados por Dias et al (2021a).

Para realizar uma modelagem de risco a escorregamentos nesta monografia, foram utilizados os resultados da Avaliação e Mapeamento de Risco (Escala Regional e Local) da Região Metropolitana de São Paulo (Instituto Geológico et al., 2020), organizados em um banco de dados, que reúne informações coletadas sobre deslizamentos a partir de jornais,

instituições e por sensoriamento remoto. Um dos principais produtos do trabalho supracitado foi a delimitação e classificação do espaço setorial de risco a escorregamento, classificadas como setores de Risco Baixo (R1), Médio (R2), Alto (R3) e Muito Alto (R4).

Esta monografia de conclusão de curso, visando estabelecer a influência da declividade e da curvatura vertical do terreno em escorregamentos de solo, apresenta uma revisão metodológica. Assim como, uma correlação, na qual foram aplicados cálculos estatísticos pretendendo identificar padrões na suscetibilidade a escorregamentos com base nos valores de curvatura vertical do terreno e declividade em duas unidades geomorfológicas distintas da Região Metropolitana do estado São Paulo. Os municípios de Mauá e Francisco Morato foram escolhidos devido a uma ocorrência recente de escorregamentos e por apresentarem um inventário bem consolidado.

## **2. METAS E OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

A presente monografia tem como objetivo apresentar, de modo detalhado, a metodologia e os resultados obtidos com a análise da influência da declividade e curvatura vertical do terreno na suscetibilidade a escorregamentos. O enfoque é a correlação de resultados de mapeamento de risco em áreas urbanas com a análise morfométrica realizada por Modelos Digitais de Elevação (MDE) em duas resoluções espaciais.

As correlações têm o propósito de estabelecer variáveis morfométricas que possam preliminarmente compor estudos de suscetibilidade a escorregamentos em áreas urbanas. Assim, o presente trabalho apresenta informações de uma lacuna nos estudos de suscetibilidade, ao estabelecer parâmetros de classificação na correlação de declividade e curvatura vertical do terreno na composição da suscetibilidade, em estudos de classificação de riscos geológicos em escala de semidetalhe, ideal para orientar alvos para as escalas de detalhe.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos dos estudos apresentados nesse trabalho de conclusão de curso são:

- Avaliar a resolução espacial de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para a obtenção de dados geomorfológicos e a sua aplicabilidade nos estudos de suscetibilidade de escorregamentos;
- Avaliar a influência da declividade do terreno em diferentes setores de risco a escorregamento; e
- Comparar a curvatura vertical do terreno mapeada em escala de detalhe (dados de bibliografia) com os valores obtidos a partir dos modelos digitais de terreno, em duas resoluções espaciais.



### 3. TRABALHOS PRÉVIOS

#### 3.1. Geomorfologia do estado de São Paulo

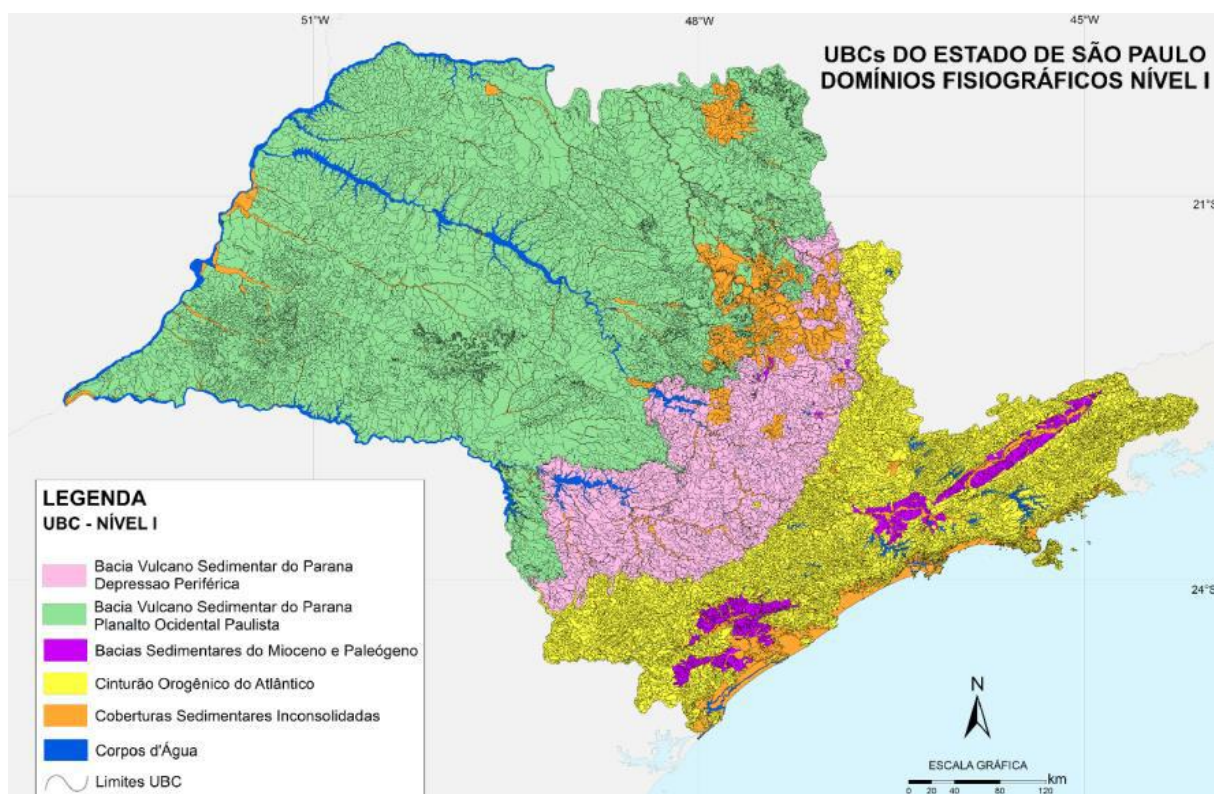
Uma etapa fundamental de um estudo de suscetibilidade à risco geológico é reconhecer a área de estudo no qual será aplicado o método de análise. A geomorfologia alerta sobre feições com maior probabilidade de eventos naturais e a entender a compartimentação do relevo paulista por diferentes critérios e autores é importante

Desde Moraes Rego (1921), a estruturação de Almeida (1964) que estabeleceu hierarquias em função das fisionomias morfológicas e embasamento geológico, e Ross & Moroz (1996) com delimitação de táxons em níveis variados de detalhe e escalas até a atual compartimentação do sistema ambiental paulista, baseado em Unidades Básicas de Compartimentação, conhecidas como UBCs (Vedovello 2000, Ferreira & Rossini Penteado, 2011).

Com o objetivo de gerar um mapa de perigo de escorregamento do estado de São Paulo, Vedovello (2000) propôs o uso de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs), para os quatro níveis de compartimentos, utilizando a uma análise escalar (Tabela 1 e Figura 1). A delimitação ocorre por observações de imagens orbitais, identificando setores homogêneos definidos pelas características das formas e dos elementos texturais. Segundo o autor, essa compartimentação permite a atualização da base permanente das unidades, que podem ser visualizadas e classificadas para a análise de fragilidades do terreno.

**Tabela 1** - Compartimentos fisiográficos obtidos para cada um dos níveis hierárquicos adotados. Retirado de Vedovello (2000).

Nível 1 - Unidades morfoestruturais e geotectônicas	Nível 2 - Unidades morfoesculturais e litoestratigráficas	Nível 3 - Unidades de relevo e litotipos	Nível 4 - Unidades Básicas de Compartimentação - UBC
Coberturas Sedimentares do Pleistoceno e Holoceno (Q)	Planícies Fluviais. Depósitos aluvionares associados à drenagem atual (A)	1 Paraná, 2 Paraíba do Sul, Ribeira, 3 Tietê, outros.	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
	Planícies Litorâneas. Depósitos marinhos, fluviais e mistos (L)	1 Iguape-Cananéia, 2 Praia Grande-Peruibe, 3 Santista, 4 Bertioga, 5 Litoral Norte, outros.	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
	Depósitos coluvionares e de tálus; depósitos colúvio-eluvionares; e coberturas detriticas indiferenciadas (C)	Planaltos, Serras, etc com depósitos coluvionares associados e com referência a localização geográfica (N).	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Bacias Sedimentares do Terciário (Mioceno e Paleógeno) (T)	Sem subdivisão nesse nível (X)	1 Planalto de São Paulo, 2 Depressão Médio Paraíba, 3 Depressão do Baixo Ribeira, 4. Formação Rio Claro, outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Bacia Vulcano- Sedimentar do Paraná - Depressão Periférica (Paleozóico-Triássico) (D)	Depressão indiferenciada (D), Planaltos, (símbolo P), serras/escarpas (E), morros isolados (M)	1 Depressão Moji-Guaçu, 2 Depressão Médio Tietê, 3 Depressão Paranapanema, Outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Bacia Vulcano- Sedimentar do Paraná - Planalto Ocidental Paulista (Jurássico-Cretáceo) (O)	Planalto Centro Ocidental indiferenciado (O), Planaltos (P), serras/escarpas (E), morros isolados (M)	1 Planalto Centro Ocidental, 2 Planalto em Patamares Estruturais de Ribeirão Preto, 3 Planaltos Residuais de Franca/Batatais, 4 Planalto Residual de São Carlos, outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Cinturão Orogênico do Atlântico (Proterozóico) (P)	Planaltos (P), serras/escarpas (E), morros isolados (M)	1 Planalto da Mantiqueira, 2 Planalto da Bocaina, 3 Planalto de Paraitinga/Paraibuna, outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Corpos D'Água			



**Figura 1** - UBCs do Estado de São Paulo compartimentados em cinco domínios fisiográficos relativos às morfoestruturas adotadas no Nível 1 da compartimentação. Fonte: Vedovello (2000).

Utilizando a classificação de Vedovello (2000), o município de Francisco Morato encontra-se dentro da Unidade Morfoestrutural e Geotectônica do Cinturão Orogênico do Atlântico, no nível hierárquico 2, localiza-se em uma unidade morfoestrutural de planaltos, mais especificamente o Planalto de Jundiá, inserido no nível hierárquico 3, segundo o mesmo autor. De acordo com Ponçano et al. (1981) no Planalto de Jundiá predominam relevos de colinas e morros baixos com topos convexos, descritos majoritariamente como morrotes.

Aplicando a classificação de Vedovello (2000) para o município de Mauá, nota-se que ele engloba, em sua maioria, a Unidade Morfoestrutural e Geotectônicas do Cinturão Orogênico do Atlântico e pequenas porções no Noroeste com coberturas sedimentares inconsolidadas e bacias sedimentares do Mioceno e Paleógeno.

### 3.2. Contextualização geológica das áreas

As condições geológicas de determinada área podem favorecer a ocorrência de movimentos de massa. Apresenta-se abaixo de forma breve as condições geológicas de cada uma das áreas de estudo.

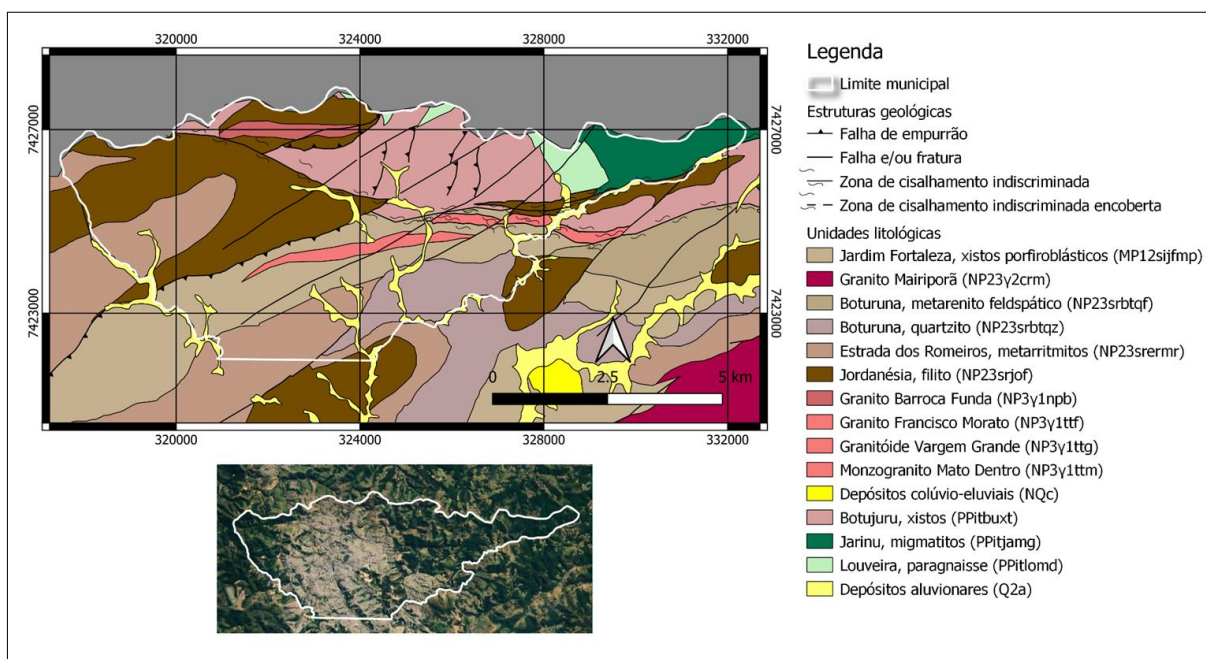
#### 3.2.1. Município de Francisco Morato

Segundo Juliani et al. (2014), que mapeou a Folha Atibaia (SF.23-Y-C-III), na qual se encontra o município de Francisco Morato, a região está inserida no Cinturão Ribeira Central na Província Mantiqueira e inclui dois domínios geológicos delimitados por zonas de cisalhamento, sendo eles: o Domínio Socorro, Guaxupé e o Domínio Serra do Itaberada, São

Roque.

Segundo o Mapa Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo em escala 1:750.000 do SGB/CPRM (Serviço Geológico do Brasil, antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), são identificadas três unidades geológicas no município, sendo estas: O Grupo São Roque (Neoproterozoico), nesta porção aflora a Formação Estrada dos Romeiros, composta por metapelitos quartzosos, metapelitos e metarritmitos; O Grupo Serra de Itaberaba (Mesoproterozoico), composto por uma sequência vulcano-sedimentar intensamente deformada; e o Complexo Varginha-Guaxupé, em uma unidade paragnáissica migmatítica superior (Perrota et al., 2005).

Segundo o Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo na escala de 1:250.000 (Almeida et al., 2019), a região do município de Francisco Morato abrange (Figura 2): Depósitos aluvionares; o Grupo São Roque, aflorando as formações Estrada dos Romeiros, Boturuna e Jordanésia; o Grupo Itapira com as Formações Botujuru, Louveira e Jarinu; o Grupo Serra de Itaberaba aflorando a Formação Fortaleza; a Suíte Granítica Tico-Tico, aflorando na região os corpos graníticos de Francisco Morato, Vargem Grande e Monzogranito Mato dentro; e a Suíte Granítica Nazaré Paulista representado na área pelo corpo Granito Barroca Funda.



**Figura 2-** Mapa geológico do município de Francisco Morato. Modificado de Almeida et al., 2019.

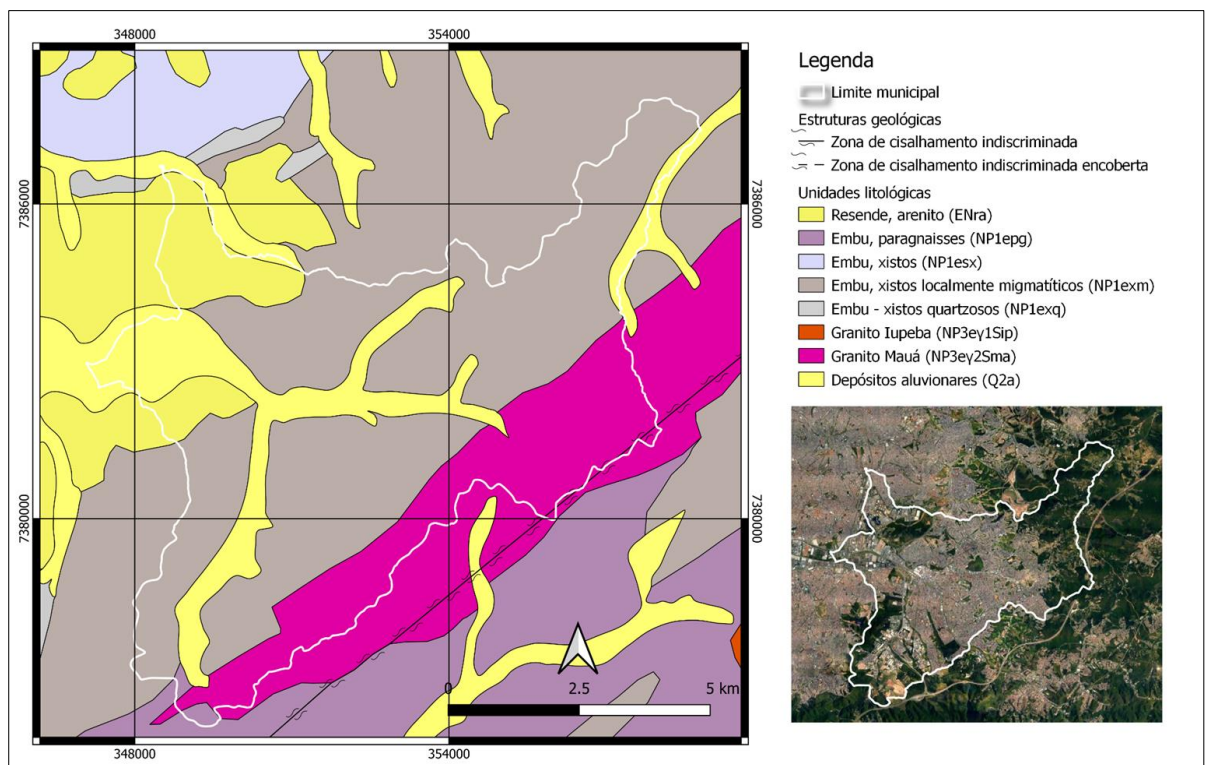
### 3.2.2. Município de Mauá

Segundo o Mapa Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo em escala 1:750.000 do SGB/CPRM (Perrota et al., 2005), são identificadas quatro unidades geológicas no município, sendo elas: depósitos aluvionares; Formação Resende, composto por arenitos, conglomerados, diamictitos e lamitos; o Complexo Embu, em uma unidade de xistos, localmente migmatizados; e pelo Granito Mauá. Segundo Silva (1992), que realizou um



trabalho sobre o Complexo Embu na Folha Mauá (SF.23-Y-D-IV-3), existem quatro unidades maiores na área, sendo elas: o Complexo Embu, Complexo Costeiro, corpos granitóides sin-a tardi-tectônicos e coberturas sedimentares terciário-quaternárias. O Complexo Costeiro encontra-se a norte da falha de Cubatão, enquanto o Complexo Embu teria seu limite norte nas falhas de Taxaquara-Jaguari e Monteiro Lobato e a Sul pela Falha de Cubatão.

Segundo o Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo na escala de 1:250.000 (Almeida et al., 2019), a região do município de Mauá abrange (Figura 3): Parte do Complexo Embu, no qual na área afloram, xistos, xistos Quartzosos, xistos localmente migmatizados e paragneisses; arenitos da Formação Resende; Depósitos aluvionares; e Biotita Granitos Ediacaranos, como o corpo Granito Mauá.



**Figura 3** - Mapa geológico do município de Mauá. Modificado de Almeida et al., 2019.

### 3.3. Processos de movimento de massa e as ferramentas de avaliação de riscos

Para uma análise específica dos movimentos de massa, Augusto Filho (1992), apresenta tais processos classificados em quatro tipos: rastejos (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*), categorizados de acordo com suas características do movimento, material e geometria (Tabela 2).

**Tabela 2** - Classificação dos principais tipos de movimentos de massa em encostas brasileiras. Modificado de Augusto Filho, 1992.

Processos	Características do movimento/material/geometria
Rastejo ( <i>Creep</i> )	Vários planos de deslocamento (interno) Velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescente com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, depósitos rocha alterada/fraturada Geometria indefinida
Escorregamento ( <i>Slides</i> )	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidade médias (m/h) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis:  Planares: solos poucos espessos, solo e rochas com um plano de fraqueza; Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza.
Quedas ( <i>Falls</i> )	Sem planos de deslocamento Movimento tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades altas (vários m/s) Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos etc. Tombamento
Corridas ( <i>Flows</i> )	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo de drenagens. Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Outra classificação é a de Cruden & Varnes (1996), na qual os autores consideram como principal critério de classificação como o movimento é distribuído através da massa

deslocada, resultando em cinco tipos, sendo eles: queda (*fall*), tombamento (*topple*), escorregamento (*slide*), espalhamento (*spread*) e corridas (*flow*). A queda é definida pelo desprendimento de solo ou rocha de uma encosta íngreme, com pouco ou nenhum deslocamento de cisalhamento. O tombamento é a rotação para a frente do talude de uma massa de solo ou rocha em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. Os escorregamentos são movimentos de solo ou rocha ocorrendo em superfícies de ruptura ou zonas de finas tensão de cisalhamento intensa. O termo “espalhamento” refere-se a disseminação de solo coeso ou rocha compacta por meio de um material mais suave, no qual o último flui de maneira plástica. E por fim, as corridas, definidas como um movimento contínuo no qual as superfícies de cisalhamento são de curta geração e não preservadas.

Segundo a COBRADE (Classificação e Codificação Brasileira de Desastres), os desastres naturais podem ser divididos em cinco grupos: desastres geológicos, hidrológicos, meteorológicos, climatológicos e biológicos. Onde os desastres geológicos são subdivididos em quatro grupos: erosão, emanção vulcânica, terremoto e movimento de massa. Por sua vez, os movimentos de massa são classificados em: i) Quedas, Tombamentos e Rolamentos; ii) Deslizamentos; iii) Corridas de Massa; e iv) Subsidiências e colapsos.

Em um estudo de suscetibilidade algumas definições adicionais ainda são importantes, independente da classificação e terminologia utilizada, deslizamentos podem ser classificados como um perigo, sendo este uma condição ou um fenômeno com potencial de causar uma consequência negativa. Segundo Cerri & Amaral (1998), um fenômeno com perdas e danos é chamado de acidente e sem danos de evento. Desastre, é definido como o resultado de eventos adversos, naturais ou devido a intervenção humana, sobre um ecossistema (vulnerável), causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. Os desastres naturais são fenômenos e desequilíbrios da natureza de origem externa, sem interferência humana, que causa sérios danos e prejuízos que ultrapassam a capacidade dos afetados em conviver com os impactos (Castro, 1998).

Ainda na conceituação básica da gestão de riscos de desastres, para a análise de risco, é importante mensurar a vulnerabilidade de uma área, ou seja, o grau de perda para a comunidade da área sobre o efeito de um processo ou fenômeno. Assim como, a suscetibilidade de uma área, que está diretamente relacionado à potencialidade de ocorrência de processos naturais e/ou induzidos, em outras palavras é a probabilidade de ocorrência. Esses dois conceitos anteriores estão diretamente ligados ao conceito de risco, que é a relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno e sua magnitude ou consequências sobre um dado elemento, grupo ou comunidade, destaca-se que quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco. (Brasil, 2007).

Contudo, para a gestão dos riscos de desastres é importante destacar a avaliação da probabilidade de ocorrer um evento em determinado terreno. Como parte indissociável das avaliações de perigo, suscetibilidade e consequente determinação do risco (UNISDR, 2009).

A probabilidade de ocorrer um deslizamento em dado terreno apresenta variabilidade, na medida que alguns terrenos são muito mais propensos, e assim mais prováveis, a sofrer determinado evento em detrimento a outros. Com intuito de se realizar trabalhos de previsão e gestão desses riscos de eventos de movimentos de massa, as avaliações do terreno podem ser realizadas em escalas diversas, de semidetalhe ou menor (1:10.000, 1:25.000 e até 1:50.000), no qual utilizam-se de técnicas de sistemas de informação geográfica para caracterizar o terreno na avaliação do perigo ou suscetibilidade.

Assim, é importante entender a diferença entre o que podemos chamar de processo de movimento de massa e desastres geológicos do tipo movimentos de massa, além do conceito de evento, e o que ocorre em cada um desses processos independentes de prejuízos e vítimas. E, pontuar ainda, que a presente monografia aborda os processos de movimento de massa do tipo escorregamento na construção de sua metodologia (Augusto Filho 1992; Cruden & Varnes 1996), ou deslizamentos (COBRADE, 2020).

### **3.4. Suscetibilidade de escorregamentos**

Segundo Cerri & Amaral (1998), a suscetibilidade de uma área significa a possibilidade de um processo geológico ocorrer, induzido ou não, sem gerar perda e/ou danos. Ou seja, seria a predisposição de um terreno a ocorrência do desenvolvimento de um fenômeno ou processo físico (Canil et al., 2018). Já o risco seria a possibilidade de um fenômeno causar danos e perdas (acidentes) e, quando a ocorrência de perdas e danos é incerta, o fenômeno recebe a denominação de evento.

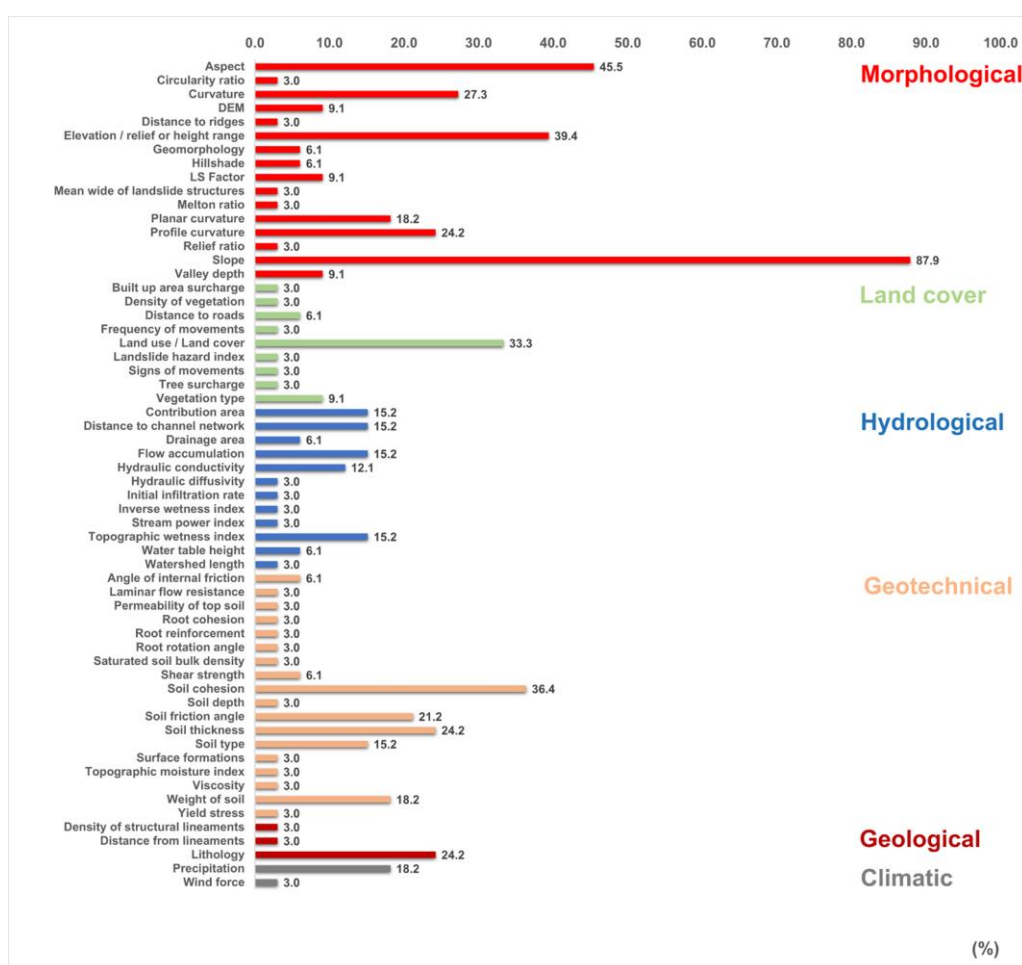
O IPT & CPRM (2014) criou guias para uniformizar os mapeamento de suscetibilidade a desastres naturais em escala 1:25.000, onde o procedimento metodológico consiste em: fazer uma síntese bibliográfica e estruturar os dados em mapas temáticos; analisar, classificar e zonear as suscetibilidades utilizando métodos estatísticos para integrar dados de geomorfologia, geologia e hidrologia-pedologia; fotointerpretação de feições associadas aos processos analisados; produzir um pré-mapa de áreas suscetíveis; verificar e validar as áreas em campo; e por fim, revisar o pré-mapa e consolidar a carta de suscetibilidade e a base de dados correspondente.

A partir da integração de dados de geomorfologia (declividade), geologia (dados estruturais) e dados hidrológicos-pedológicos (curvatura de encosta), são estabelecidos classificações qualitativas em termos de suscetibilidade (classes baixas, médias ou altas), onde este zoneamento representa maior ou menor propensão a geração e desenvolvimento do processo a ser analisado. No caso de corrida de massa e enxurrada aplicam-se retroanálises históricas e parâmetros morfométricos da bacia de drenagem, padrão de relevo predominante e áreas classificadas como alta suscetibilidade em mapeamentos anteriores (Canil et al., 2018).

As cartas de suscetibilidade são realizadas com foco na elaboração de políticas públicas de ordenamento territorial e desenvolvimento sustentável, sendo direcionadas aos

municípios para a elaboração e revisão de planos diretores (Canil et al., 2018).

Segundo Dias et al. (2021a), que realizou uma revisão de mapas de suscetibilidade pelo Brasil, em cerca de 88% dos trabalhos revisados pelos autores, a variável temática de declividade é utilizada em mapas de suscetibilidade e em aproximadamente 24% a variável temática é a curvatura vertical, como pode ser observado na Figura 4. Sabe-se que estes parâmetros são influentes em escorregamentos, porém não foi realizada uma quantificação da influência da declividade e curvatura e muitas vezes o método de validação dos mapas de suscetibilidade é indefinida. Os modelos de estabilidade de talude e modelos estatísticos (valor informativo) são os mais utilizados para a análise a suscetibilidade, enquanto para validação dos resultados, dentre os nove métodos mais utilizados, na maioria dos trabalhos (54,1%) é utilizado a metodologia da área sob a curva (*AUC - area under the curve*).



**Figura 4** - Variáveis temáticas utilizadas na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos no Brasil.

Fonte: Dias et al. (2021a).

### 3.5. Declividade como parâmetro morfométrico

A declividade é definida como a primeira derivada da elevação em relação a distância horizontal (Valeriano, 2008) e indica a taxa de variação da elevação na vertical em relação à horizontal, variando de 0° a 90°. Segundo Florenzano (2008) a declividade é a inclinação do relevo em relação ao plano horizontal.



Sendo assim, define-se que a declividade corresponde ao ângulo que o plano tangente a uma superfície passando pelo centro do pixel faz com o plano do horizonte, definida como uma função  $z = f(x,y)$ , onde a declividade seria a taxa de variação de  $z$  em relação a superfície e  $x$  a resolução do pixel, expressa pela seguinte equação:

$$\text{Declividade} = \sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2} = \tan^{-1}, \text{ resultando em um valor em graus.}$$

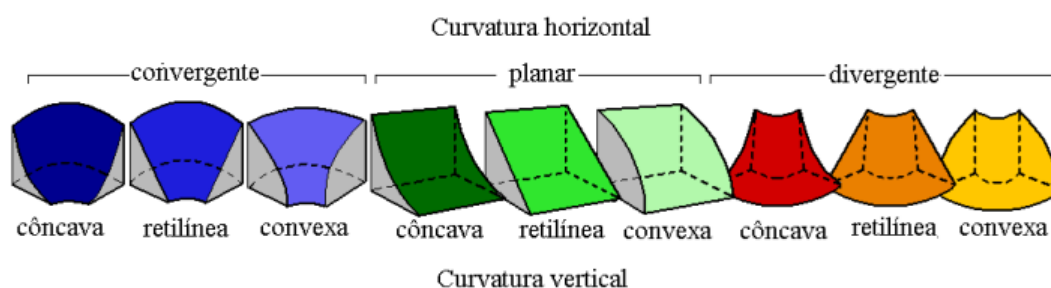
[equação 1]

Para confeccionar os mapas foi utilizado o software QGIS, que aplica o cálculo de derivada diretamente sobre o MDE na resolução espacial selecionada, que a partir do uso da equação 1 sobre o MDE retornou valores da inclinação do terreno (em graus) para cada pixel da imagem que foram classificados em 5°, 17° e etc. baseado nas quebras de classe da Lei Lehman (Lei 6.766, de 19.12.1979).

### **3.6. Curvatura do terreno como parâmetro morfométrico**

Segundo Veloso (2002), a definição de curvatura está associada à definição de vertentes de um terreno. A vertente de um terreno pode ser definida como um elemento da superfície terrestre inclinado em relação à horizontal, desta forma possui um gradiente, que define uma direção ou uma orientação ao terreno. Segundo Valeriano (2008), as curvaturas do terreno são derivadas de segunda ordem do modelo digital de elevação. A curvatura pode ser dividida em curvatura horizontal e vertical (Figura 5), onde a curvatura na horizontal, também chamada de curvatura no plano, é variação da declividade na direção ortogonal à orientação da vertente e refere-se ao caráter divergente/convergente do terreno. Já a vertical, também conhecida como curvatura de perfil, é definida como a variação da declividade na direção de sua orientação e está relacionada ao caráter convexo/côncavo do terreno. Segundo Valeriano (2003), vertentes retilíneas têm valores próximos a zero ou nulos, vertentes côncavas os têm positivos e convexos têm curvatura vertical negativa.

Segundo Ohlmacher (2007), a curvatura vertical (perfil) controla a aceleração ou desaceleração do fluxo e pode afetar o movimento de depósitos e deslizamentos. Segundo o autor, as encostas com curvaturas planas são as mais suscetíveis a deslizamentos de terra, em seguida apresentam-se as encostas com curvatura côncava que são um pouco mais suscetíveis a deslizamentos de terra do que encostas convexas. Isso se dá pelas forças de resistência entre as partículas do solo resultam da convergência do material e aumentam a estabilidade. Ou seja, a suscetibilidade ao escorregamento não está ligada apenas a geometria do terreno, mas sim a resistência ao cisalhamento do mesmo. Destaca-se, que embora tenha um reduzido número de bibliografia sobre a relação da curvatura com a suscetibilidade, sob os aspectos de mecânica do solo, Dias et al. (2021a) mostra que 24% dos trabalhos analisados utiliza esse parâmetro morfométrico na caracterização da suscetibilidade de movimentos de massa, que mostra que pesquisadores a relacionam com a probabilidade de eventos.



**Figura 5** - Definição de curvatura do terreno por utilizada pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) retirada de Valeriano (2008).

Apenas é importante destacar que esta monografia optou por utilizar apenas a curvatura vertical do terreno, devido à disposição dos dados de escala de detalhe do projeto de mapeamento da RMSP (Instituto Geológico et al., 2020), onde eram abordados de forma mais detalhada a curvatura vertical do terreno.

Quanto à obtenção desses atributos, para o presente trabalho foi utilizado o QGIS, aplicando uma rotina computacional, baseada na equação a seguir.

$$k_v = - \frac{p^2 r + 2pqs + q^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$$

[equação 2]

Onde  $p = \partial z / \partial x$ ;  $q = \partial z / \partial y$ ;  $r = \partial^2 z / \partial x^2$ ;  $s = \partial^2 z / \partial x \partial y$ ;  $t = \partial^2 z / \partial y^2$

A equação utilizada pela ferramenta WhiteBox do QGIS baseia-se nos trabalhos de Florinsky (2017), calculando a curvatura vertical ou a taxa de mudança na inclinação ao longo de uma linha de fluxo, a partir de um MDE, que para o autor é a curvatura de uma seção normal que possui uma reta tangente comum com uma reta inclinada em um determinado ponto da superfície.

Quanto à classificação, dos números absolutos da curvatura vertical do terreno, não existe uma referência definitiva sobre os valores de quebra, e nem de insumos adequados à modelagem. Contudo, a literatura apresenta valores de  $-0,55\% \text{ } 100 \text{ m}^{-1}$  a  $+0,55\% \text{ } 100 \text{ m}^{-1}$  como curvaturas verticais retilíneas (Valeriano, 2003), enquanto os valores utilizados no projeto do Instituto Geológico apresentaram quebras naturais, baseada em variância dos dados obtidos dentro do universo de análise, definidos para as escalas de 1:10.000 e 1:25.000, com valores distintos, embora ambos obtidos a partir de Modelo Digital de Superfície (MDS) de resolução 5m.

### 3.7. Espacialização e tratamentos de ocorrências de escorregamentos

Com o intuito de escolher um método para identificar o grau de influência de cada um dos elementos de análise, neste caso curvatura vertical do terreno e declividade do terreno, em movimentos de massa, realizou-se uma pesquisa bibliográfica de métodos anteriormente

utilizados para esse fim. Dentre os quais, foram revisados trabalhos como: Meirelles et al. (2018) no qual a partir de um inventário de escorregamentos foram atribuídos pesos para cada um dos elementos estudados e realizada a aplicação de AHP (*Analytic Hierarchy Process*); Luchene et al. (2021), no qual foi realizada uma avaliação da suscetibilidade a deslizamentos a partir de uma Rede Neural Artificial (ANN - *Artificial Neural Network*), o método requer um inventário com ocorrências de deslizamentos e amostras de não ocorrências com propensão aos deslizamentos; e o trabalho de Dias et al. (2021b), neste realizou-se uma avaliação da suscetibilidade a deslizamentos rasos baseada em uma estatística bivariada de fatores geológicos (litologia e estruturas) e morfológicos (curvatura, elevação, declividade e aspecto), foram geradas curvas de sucesso para cada parâmetro e estudada a AUC (área sob a curva) que reflete a taxa de sucesso para o modelo utilizando dados de inventários, baseado nos estudos anteriores de Zêzere et al. (2007).

Durante uma primeira avaliação dos dados e dos métodos elegeu-se o método de Dias et al. (2021b) a ser utilizado, todavia durante o processo de produção dos mapas notou-se uma divergência nas áreas de estudo. No trabalho de Dias et al. (2021b), a análise é realizada no Parque Estadual da Serra do Mar, em contexto de encostas naturais sem ocupação antrópica, enquanto as áreas de estudo desta monografia apresentam um contexto urbano, com forte influência de indução a movimentos de massa, devido a cortes e aterro, e a falta de disciplina de águas pluviais relacionados a um uso do solo inadequado. Deste modo, o foco da monografia tende ao risco geológico urbano e por este motivo optou-se por utilizar os setores de risco e estruturar uma nova lógica de análise.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Banco de dados**

Na realização deste projeto foram utilizados os dados do trabalho de Avaliação e Mapeamento de Risco (Escala Regional e Local) de parte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP – Trechos Norte/Oeste/Sudoeste/Sudeste) e do Litoral Norte, realizado em 2020 pela empresa Regea Geologia, Engenharia e Estudos Ambientais em contrato realizado para o Instituto Geológico de Estado de São Paulo – IG (atual IPA, Instituto de Pesquisas Ambientais). Para cada município do RMSP foi elaborado um Mapeamento de Riscos de Movimentos de Massa e Inundações, em escala de semi-detalle ou locais (1:3.000).

O trabalho resultou na setorização de áreas de risco, ou seja, áreas possíveis de serem atingidas por fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos que causem danos diretos e indiretos (materiais e econômicos) e/ou intangíveis aos moradores da região. Dentro de uma área de risco foram delimitados setores de riscos, que são classificadas como setores de Risco Muito Alto (R4), Risco Alto (R3), Risco Médio (R2) e Risco Baixo (R1), no caso específico desse trabalho do IG foi apresentado também os setores em R0, considerados como riscos muito baixos ou nulos, onde dentro de uma mesma área de risco pode conter

mais de um setor de risco. A descrição detalhada dos parâmetros que definem cada setor deriva de Brasil (2007), apresentada na Tabela 3.

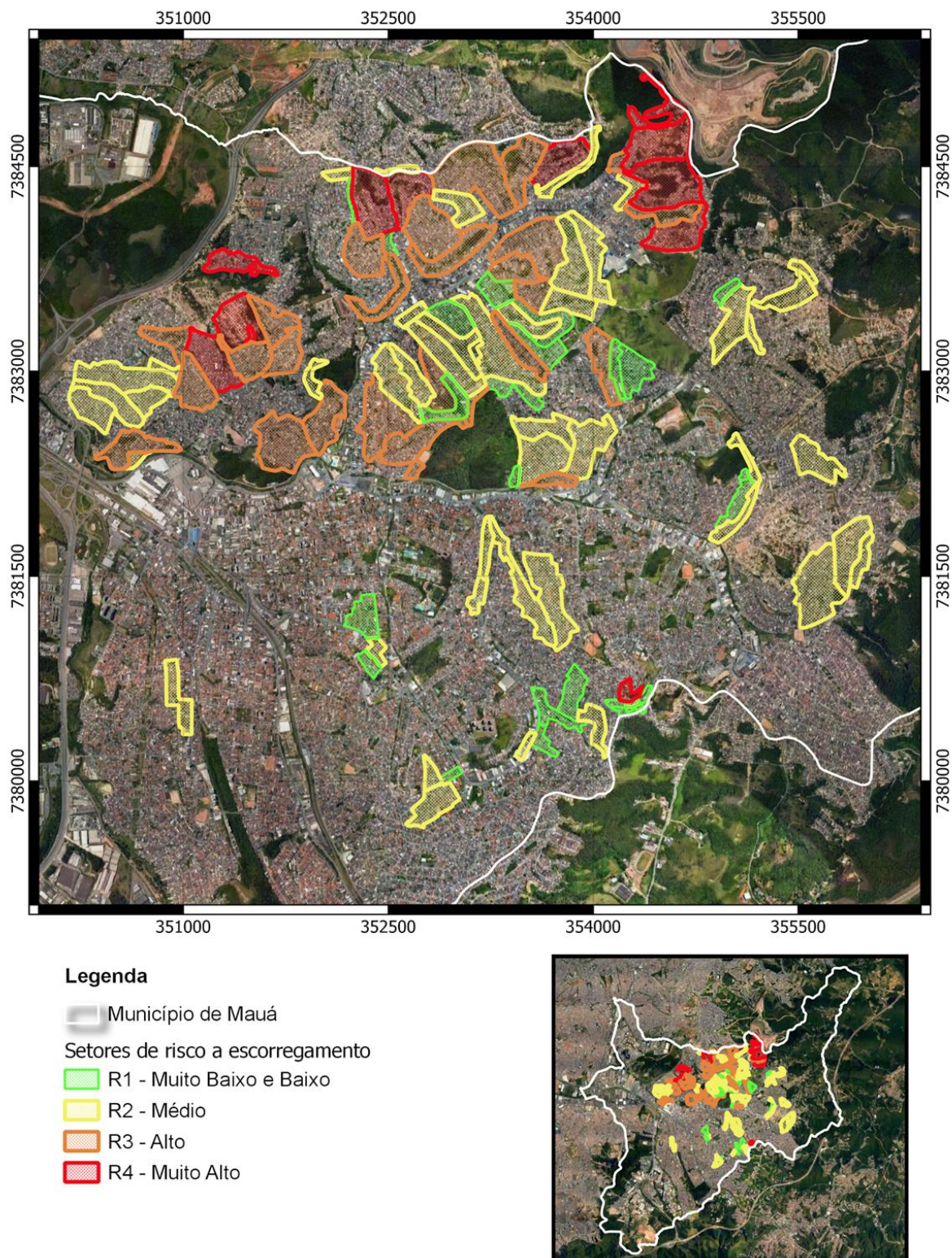
Para o estudo foram utilizados os dados do mapeamento de campo dos setores de risco, os quais além do grau de risco fornecem parâmetros de curvatura e declividade observados em campo. Ressalta-se que, mesmo um Risco Baixo (R1) apresenta possibilidade, embora de baixa probabilidade. O Risco Médio (R2) é suscetível do ponto de vista geométrico, geomorfológico ou topográfico. O Risco Alto (R3) é classificado quando além de propício, são apresentados sinais de movimentação, ou seja, o processo já está em andamento, entretanto o processo é esperado. No Risco Muito Alto (R4) o processo está completamente instalado e/ou ocorrido e são esperadas novas ocorrências.

Os setores de risco mapeados pelo Instituto Geológico et al. (2020) nos municípios de Mauá e Francisco Morato encontram-se, respectivamente, nas Figuras 6 e 7. O número de setores de risco por núcleo urbano encontra-se na Tabela 4.

**Tabela 3** - Critérios para a determinação dos graus de risco. Fonte: Brasil (2007).

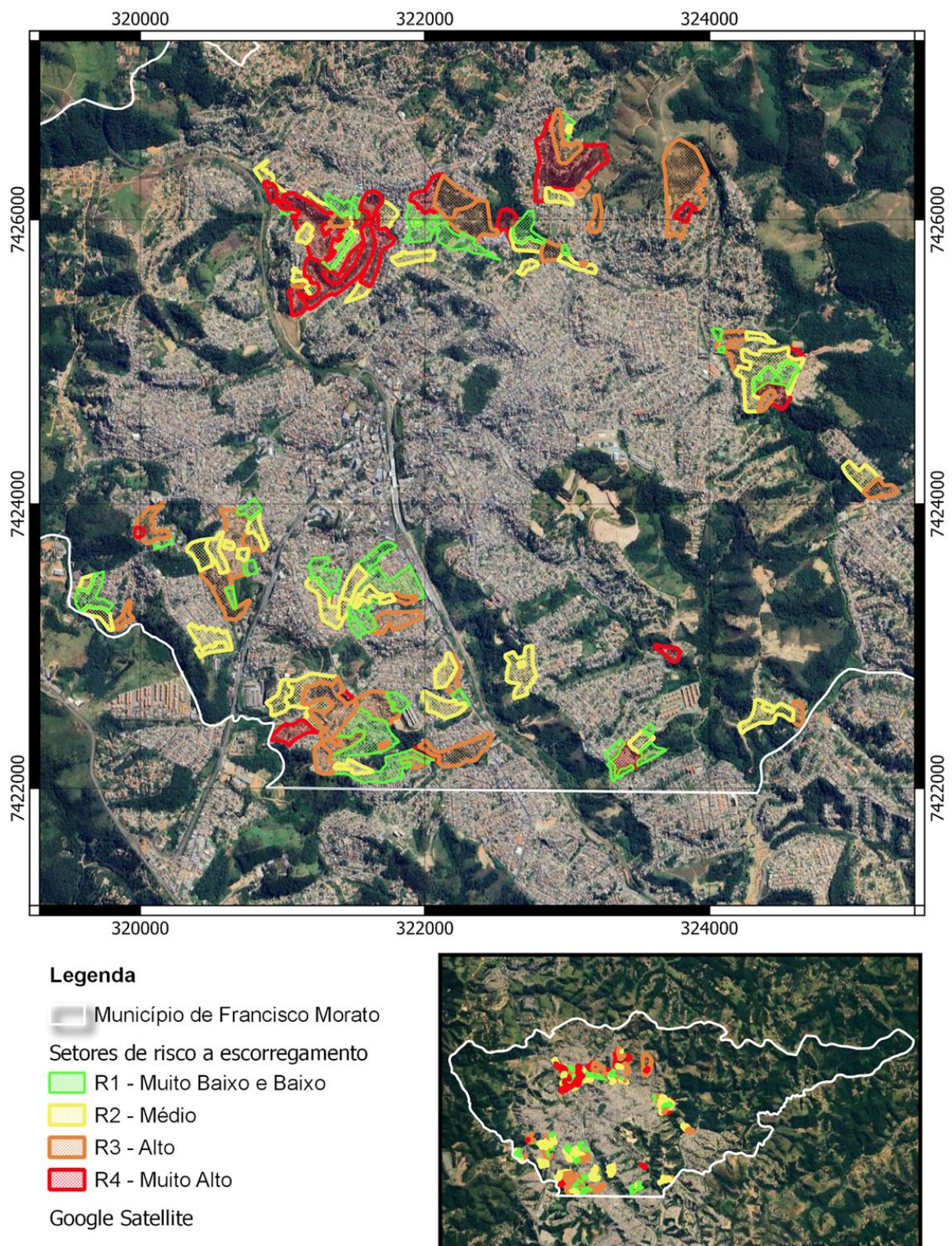
Grau de Probabilidade	Descrição
<b>R1 - Baixo ou sem risco</b>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno etc.) e o nível de intervenção no setor são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. não se observa(m) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens.</p> <p>3. mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.</p>
<b>R2 - Médio</b>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno etc.) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. observa-se a presença de algum(s) sinal/feição/ evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento.</p> <p>3. mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
<b>R3- Alto</b>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. observa-se a presença de significativo(s) sinal/ feição/ evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo.</p> <p>3. mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
<b>R4 - Muito Alto</b>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. os sinais/feições/evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de deslizamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação à margem de córregos, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. É a condição mais crítica, sendo impossível monitorar a evolução do processo, dado seu elevado estágio de desenvolvimento.</p> <p>3. mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>





**Figura 6** - Setores de Risco a escorregamento mapeados pelo Instituto Geológico et al. (2020) no município de Mauá.





**Figura 7** - Setores de Risco a escorregamento mapeados pelo Instituto Geológico et al. (2020) no município de Francisco Morato.

**Tabela 4** - Número de setores de risco dos núcleos urbanos da Região Metropolitana do estado de São Paulo avaliados.

Setores de risco	Número de setores de Risco do município de Mauá	Número de setores de Risco do município de Francisco Morato
Risco Baixo (R1)	23	33
Risco Médio (R2)	46	45
Risco Alto (R3)	26	30
Risco Muito Alto (R4)	11	20

#### 4.2. Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para a extração da altimetria, declividade e curvatura vertical, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM (Strobl 2020), neste trabalho será apresentado como MDE\_30m. Trata-se de um Modelo Digital de Superfície (MDS – Guth et al. 2021) gerado por interferometria de radar, com distribuição gratuita pela Agência Espacial Europeia (ESA) e resolução espacial de 30m. Esse MDE tem se mostrado superior a outros MDEs gratuitos de distribuição global a partir de 2020, em termos de acurácia vertical e representação do relevo (Guth & Geoffroy 2021).

Para uma segunda verificação dos dados recorreu-se à utilização do Modelo Digital de Superfície (MDS) com resolução espacial de 5m para a região Metropolitana do Estado de São Paulo. O MDS foi mesmo utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020), o intuito foi se aproximar do produto já produzido pela equipe e utilizar dados de voo próximos ao mapeamento de campo entre os meses de janeiro e abril de 2020. As referências nesta monografia apresentam o produto como MDS\_5m.

Para a produção do produto, altimetria, declividade e curvatura do MDE, foi utilizado o software QGIS 3.28.4 (QGIS Development Team, 2023) e posteriormente realizou-se a correlação dessas informações entre dados de escorregamentos anteriores.

#### 4.3. Declividade

O mapa de declividade foi produzido no software QGIS 3.28.4 (QGIS Development Team, 2023) a partir do algoritmo *Slope*.

A partir do mapa de declividade produzido, o processo de estruturação do banco de dados utilizado para a análise se deu da seguinte forma:

1. Delimitação da área de estudo aos setores de risco a escorregamentos mapeados pelo Instituto Geológico et al. (2020), classificados como risco baixo (R1), médio (R2), alto (R3) e muito alto (R4), para ambos os municípios (Figuras 3 e 4);
2. Avaliação individual dos valores de declividade média, máxima e mínima por classificação de risco, ou seja, foram avaliados os valores de declividade nos setores



classificados como risco muito alto (R4), alto (R3), médio (R2) e baixo (R1) de forma individual.

3. Consolidação dos resultados dos setores de risco correspondentes nos dois municípios para obtenção de uma amostragem mais robusta e segura; e
4. Produção gráficos e avaliação intervalos de confiança estabelecidos para o entendimento da sustentabilidade a escorregamentos em relação ao meio físico.

O processo foi repetido para o Modelo Digital de Superfície (MDS) com resolução de 5m utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020) durante o mapeamento.

#### **4.4. Curvatura vertical do terreno**

O mapa de curvatura vertical do terreno foi produzido a partir de um complemento *Whitebox Geospatial Analysis Tools* (Lindsay, 2014) no software QGIS. A ferramenta utilizada calcula a curvatura do perfil (ou vertical), ou a taxa de mudança na inclinação ao longo de uma linha de fluxo, a partir de um MDE. Segundo Florinsky (2017), a curvatura vertical é uma seção normal tendo uma linha tangente comum com uma linha de inclinação em um determinado ponto da superfície, sendo assim a variável apresenta um intervalo ilimitado e pode assumir valores positivos ou negativos, onde valores positivos indicam aceleração do fluxo, valores negativos desaceleração do fluxo e a unidade de medida é em  $m^{-1}$ .

Como citado anteriormente, segundo Valeriano (2003), vertentes retilíneas têm valores próximos a zero ou nulos, vertentes côncavas os têm positivos e convexos têm curvatura negativa. Entretanto, não existem zeros absolutos na natureza, desta forma é necessário deliberar o intervalo próximo a zero que define a curvatura retilínea é uma proposta difícil.

Como parte da análise do projeto, cada polígono dos setores do mapeamento de detalhe foi utilizado para extrair em SIG, os dados morfométricos oriundos do MDE, visando uma classificação dos intervalos de curvatura na área de estudo. A partir dessa individualização foram avaliados os valores de curvatura vertical do terreno (oriundos do MDE) dentro de cada setor de risco, avaliando a média, mínima, máxima e desvio padrão, sem diferenciação do grau de risco e os resultados dos dois municípios foram consolidados para obtenção de uma amostragem robusta e segura. Para a análise desses resultados, foram produzidos gráficos e avaliação de intervalos de confiança estabelecidos para o entendimento da suscetibilidade a escorregamentos em relação à curvatura do terreno. O processo foi repetido para o Modelo digital de superfície (MDS) com resolução de 5m utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020) durante o mapeamento.

E como parâmetro de checagem dessa análise, cada setor de risco do detalhamento do mapeamento do Instituto Geológico et al. (2020), possui uma classificação obtida em campo, por análise qualitativa visual das encostas realizadas pelo mapeador. Assim, em cada setor de risco a escorregamento na etapa de campo, o perfil de vertente do talude natural foi classificado como côncavo, convexo ou retilíneo. A Tabela 5 apresenta um trecho da extração dos dados do banco de dados espaciais de cada um dos setores de risco dos municípios.

**Tabela 5** - Exemplo de um trecho dos dados de curvaturas utilizados mapeados pelo Instituto Geológico et al. (2020).

<b>Código do polígono do setor de risco</b>	<b>Município</b>	<b>Perfil de vertente do talude natural</b>	<b>Classe de Risco</b>
1	Francisco Morato	Convexo	R2 - Médio
2	Mauá	Convexo	R4 - Muito Alto
3	Mauá	Convexo	R1 - Muito Baixo e Baixo
4	Francisco Morato	Retilíneo	R2 - Médio
5	Mauá	Retilíneo	R1 - Muito Baixo e Baixo
6	Mauá	Côncavo	R2 - Médio
7	Francisco Morato	Côncavo	R1 - Muito Baixo e Baixo
8	Mauá	Côncavo	R3 - Alto
9	Francisco Morato	Retilíneo	R4 - Muito Alto
10	Mauá	Retilíneo	R3 - Alto

A análise da influência da curvatura vertical a suscetibilidade a deslizamentos, baseou-se nos setores de risco mapeados pelo Instituto Geológico et al (2020), esta teve os seguintes passos estabelecidos:

1. Delimitação da área de estudo aos setores de risco a escorregamentos mapeados pelo Instituto Geológico et al. (2020), classificados como risco baixo (R1), médio (R2), alto (R3) e muito alto (R4), para ambos os municípios (Figuras 6 e 7);
5. Avaliação individual dos valores dos índices de curvatura por classificação de risco, ou seja, foram avaliados os valores de curvatura nos setores classificados como risco muito alto (R4), alto (R3), médio (R2) e baixo (R1) de forma individual.
6. Consolidação dos resultados dos setores de risco correspondentes nos dois municípios para obtenção de uma amostragem mais robusta e segura; e
7. Produção de gráficos e avaliação de intervalos de confiança estabelecidos para o entendimento da sustentabilidade a escorregamentos em relação ao meio físico.

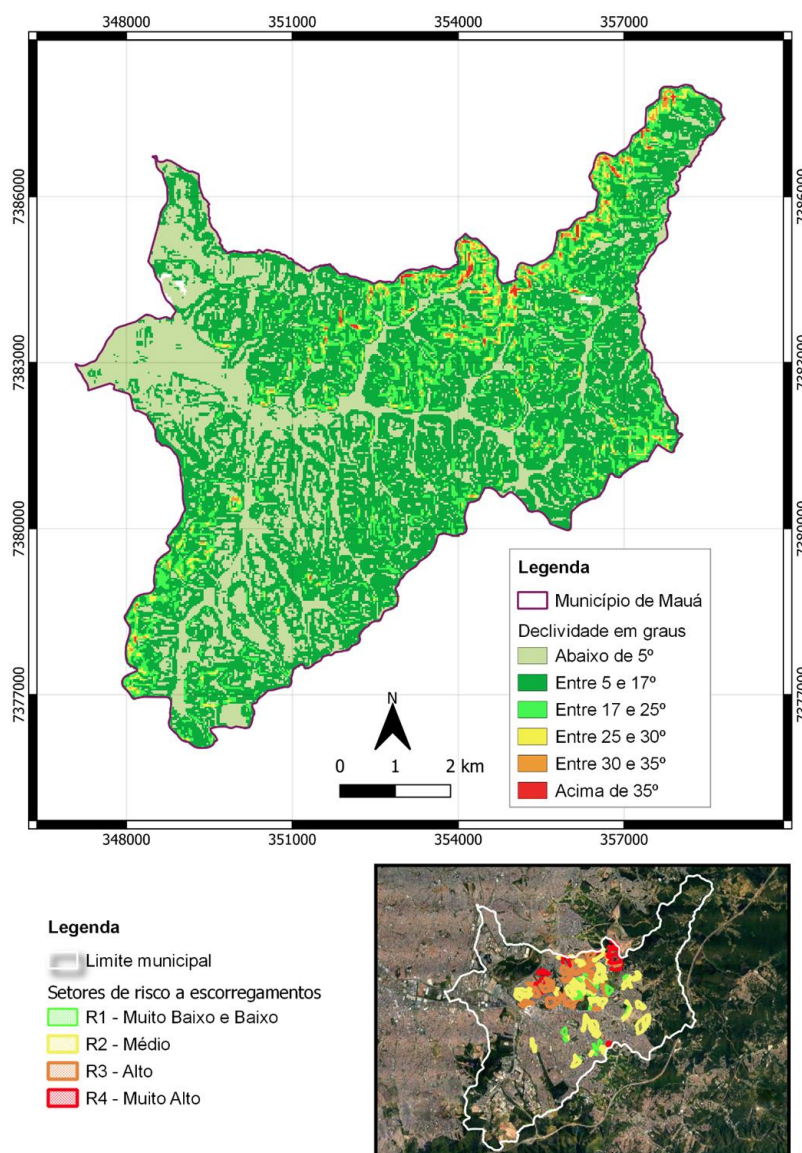
O processo foi repetido para o Modelo Digital de Superfície (MDS) com resolução de 5m utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020) durante o mapeamento.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

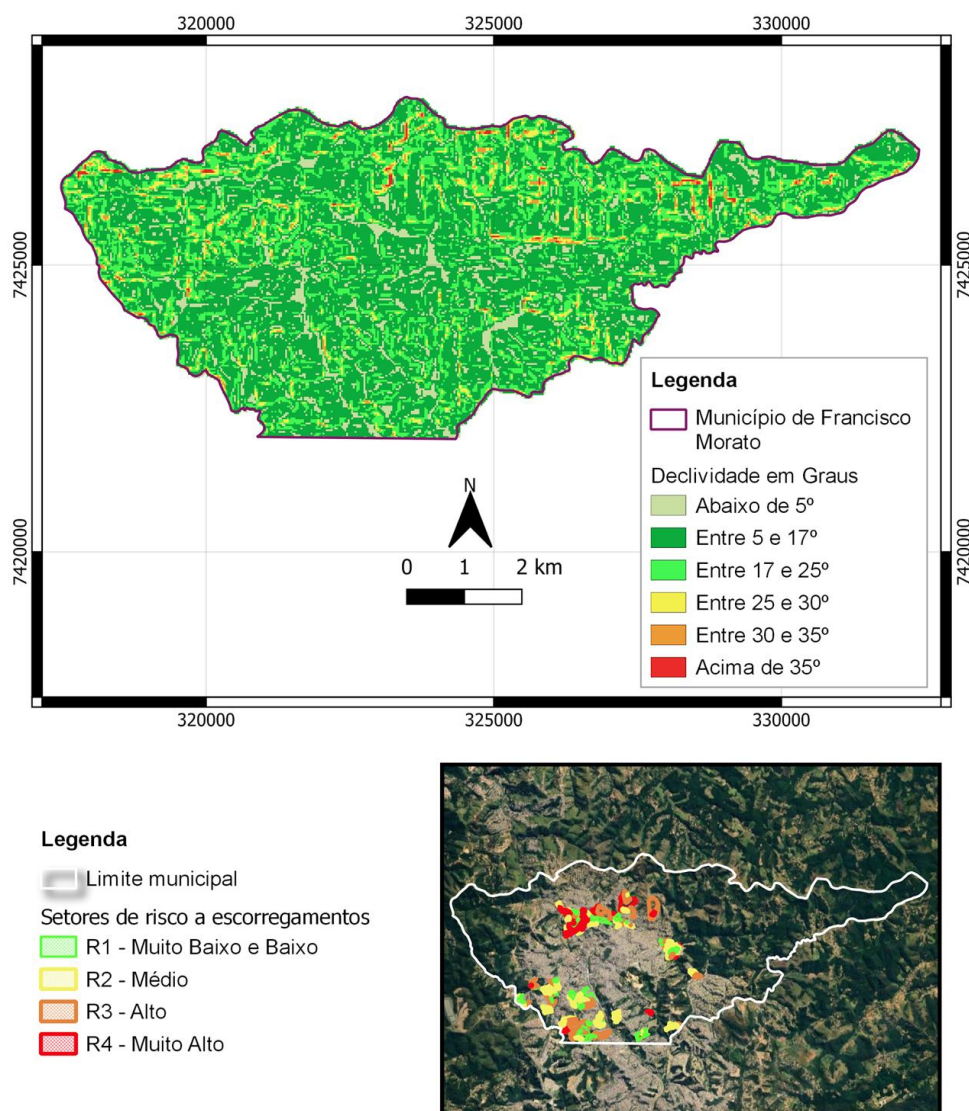
O trabalho atual teve como foco principal definir a influência da declividade e curvatura vertical do terreno na suscetibilidade a escorregamentos em dois municípios da Região Metropolitana do Estado de São Paulo, sendo estes os municípios de Francisco Morato e Mauá. Para melhor compreensão dos resultados obtidos, se faz necessário a divisão entre estes dados dentro do escopo da declividade e separadamente os resultados de curvatura, assim como o processo de produção e o pensamento crítico construído durante a produção. O estudo teve como base para a aquisição de dados os setores de risco a escorregamentos

### 5.1. Declividade

A primeira etapa do trabalho foi analisar dentro dos municípios as primeiras respostas de declividade, utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM, ou MDE\_30m. No município de Mauá, que possui 62 km<sup>2</sup>, identificou-se 18,34km<sup>2</sup> do município com declividades abaixo de 5°, cerca de 34,28km<sup>2</sup> com declividades entre 5° e 17°, aproximadamente 6,9km<sup>2</sup> entre 17° e 25°, a declividade entre 25° e 30° ocupa 1,58km<sup>2</sup> e acima de 30° menos de 1km<sup>2</sup> (Figura 8). Em relação ao município de Francisco Morato que possui um total de 49 km<sup>2</sup> de extensão, cerca de 5km<sup>2</sup> apresentam declividades abaixo de 5°, em torno de 29,83km<sup>2</sup> possuem declividades entre 5 e 17°, cerca de 11,57km<sup>2</sup> possui declividades entre 17° e 25°, declividades entre 25° e 30° ocupam cerca de 2,5km<sup>2</sup> e o restante, menos de 1 km<sup>2</sup>, da área retém declividades acima de 30° (Figura 9).



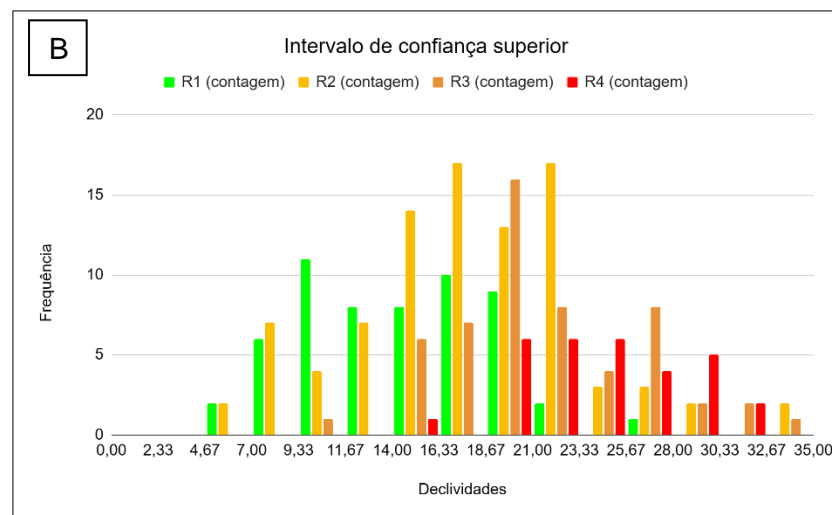
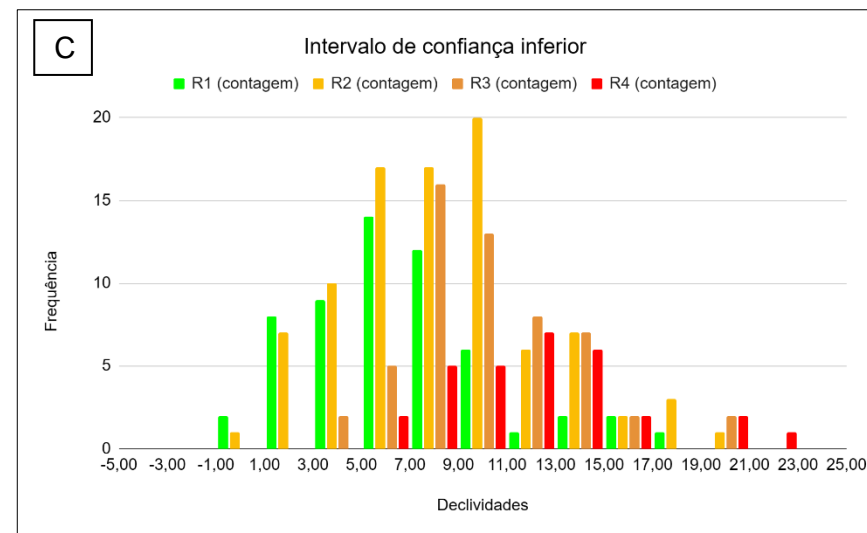
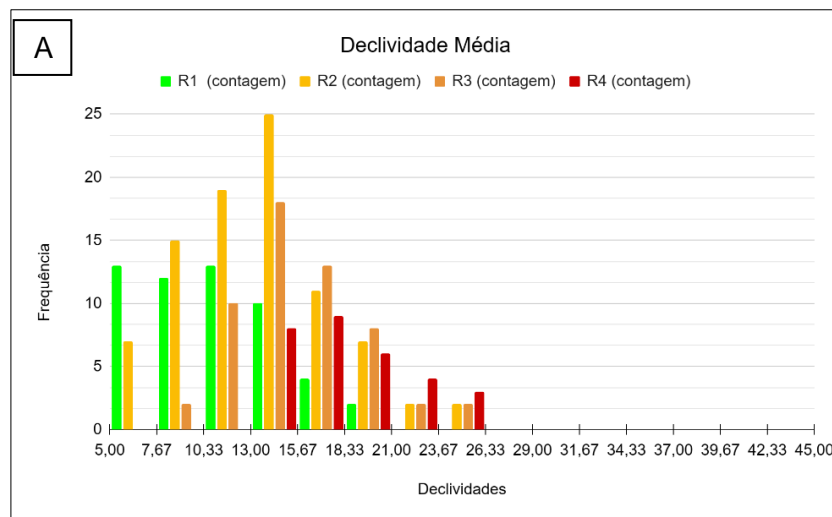
**Figura 8** - Mapa de declividade para o município de Mauá produzido com o MDE\_30m.



**Figura 9** - Mapa de declividade para o município de Francisco Morato produzido com o MDE\_30m.

Para a avaliação individualizada, cada polígono de setor de risco foi utilizado para extrair uma amostra dos dados de declividade por setor, oriundos da morfometria dos MDEs utilizados.

Os resultados da avaliação individualizada de cada setor de risco a escorregamento a partir do MDE\_30m pode ser observada na Figura 10. A representação gráfica dos valores de média de declividade encontram-se na Figura 10A. Tentando definir um intervalo de confiança de declividade em cada setor de risco, foram produzidos gráficos da média mais e menos o desvio padrão das declividades que podem ser observados respectivamente nas Figuras 10B e C, definidos respectivamente como intervalo superior e inferior. Os valores das médias da declividade de cada setor de risco são apresentados na Figura 10D.



<b>D</b>	R1	R2	R3	R4
<b>Média</b>	10,67	13,13	15,84	18,21
<b>Mínimo</b>	2,61	3,15	8,37	14,16
<b>Máximo</b>	20,74	26,15	26,2	25,87
<b>Desvio Padrão</b>	4,00	4,54	3,7	3,34
<b>Intervalo de confiança</b>	6,68 - 14,67	8,59 - 17,67	12,14 - 19,54	14,86 - 21,56
<b>Quantidade de dados</b>	57	91	55	30

**Figura 10 - A** - Histograma dos dados de declividade média por setor de risco; **B** - Histograma dos dados de declividade média somada ao desvio padrão das declividades por setor de risco, definido como intervalo de confiança superior; **C** - Histograma dos dados de declividade média subtraída ao desvio padrão das declividades por setor de risco, definido como intervalo de confiança inferior; e **D** - Tabela com a variação estatística dos valores médios de declividade amostrada em cada setor de risco - MDE\_30m.

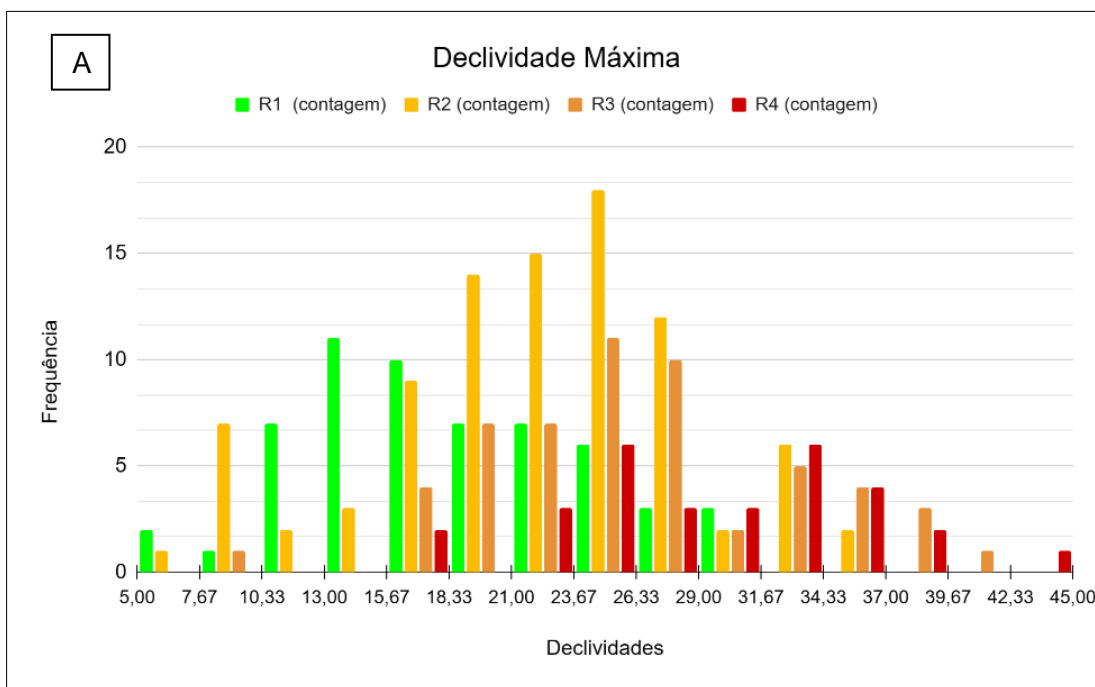
Embora a metodologia seja adequada, é necessário destacar que um setor de risco de escorregamento, conforme apresentado na Figura 11, apresenta em área planar, boa parte de sua área representada pelas moradias, e pouca expressão nos taludes, o que atrapalha os dados estatísticos supra apresentados. Nesse sentido, ainda vale destacar que nas situações de riscos avaliadas, em contexto urbano, boa parte de todos os taludes não se trata de encostas naturais, e sim de taludes de corte, com maior probabilidade de ruptura. E a inclinação média, em análise de semidetalhe, por vezes indicam como ocorreram os cortes de talude.



**Figura 11** - Esquemática de situação real para explicar necessidade de uso de declividade máxima durante o trabalho. Onde 1 representa uma superfície plana e 2 um talude natural ou de corte com declividade alta.

Desenho adaptado de Brasil (2007).

Assim, para uma análise de suscetibilidade, pode ser relevante a observação das máximas declividades, uma vez que essa variável pode inclusive ser obtida independente de unidades de análise (setor de risco). Desta forma, considerando os valores de declividade máxima, os resultados da avaliação individualizada de cada setor de risco a escorregamento podem ser observados na Figura 12, onde a Figura 12A exibe a representação gráfica dos dados de declividade máxima de cada setor e a Figura 12B exibe os valores de média, mínima e máxima das declividades máximas em cada setor de risco.



**B**

	R1	R2	R3	R4
<b>Média</b>	18,58	22,25	26,28	29,41
<b>Mínimo</b>	6,90	7,35	9,80	16,07
<b>Máximo</b>	30,99	36,31	41,45	44,27
<b>Desvio Padrão</b>	5,94	6,49	6,58	6,33
<b>Intervalo de confiança</b>	12,64 - 24,52	15,76 - 28,73	19,70 - 32,86	23,08 - 35,75
<b>Quantidade de dados</b>	57	91	55	30

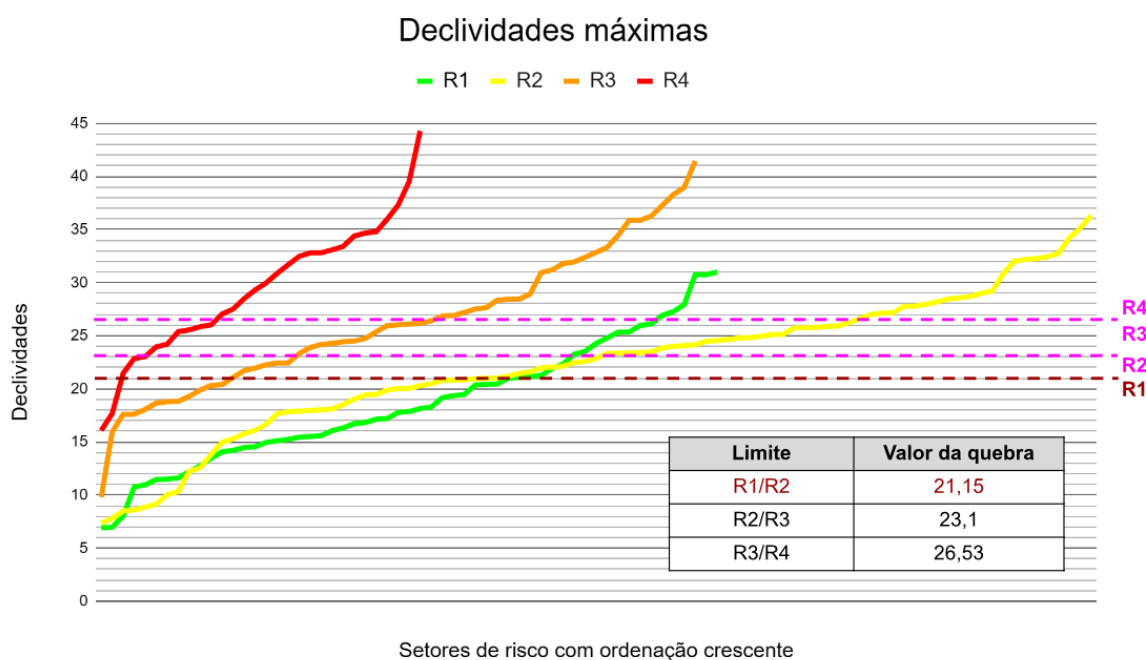
**Figura 12 - A** - Histograma dos dados de declividade máxima dos setores de risco - MDE\_30m; e **B** - Tabela com a variação estatística das máximas de declividade dos setores de risco a escorregamento- MDE\_30m.

Pretendendo confirmar os intervalos de confiança da declividade máxima de cada setor de risco a escorregamento, utilizou-se a fórmula de média ponderada (Figura 13), por exemplo, existem mais setores de R3 do que R4, sendo assim é necessário dimensionar a influência de uma quantidade maior de dados de um determinado setor sobre o outro, para definir o valor de quebra entre os setores de risco.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (\chi_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

**Figura 13** - Definição de média ponderada, onde X representa o valor mínimo da declividade máxima de cada setor e P representa o número de setores de risco.

A partir dos valores das médias ponderadas das declividades máximas foram calculados os intervalos de limite, valores de quebra, entre os setores de risco, a representação gráfica e os valores desse cálculo podem ser observados na Figura 14.



**Figura 14** - Representação gráfica dos dados de declividade máxima dos setores de risco com os valores de quebra de cada setor, baseados no MDE\_30m.s

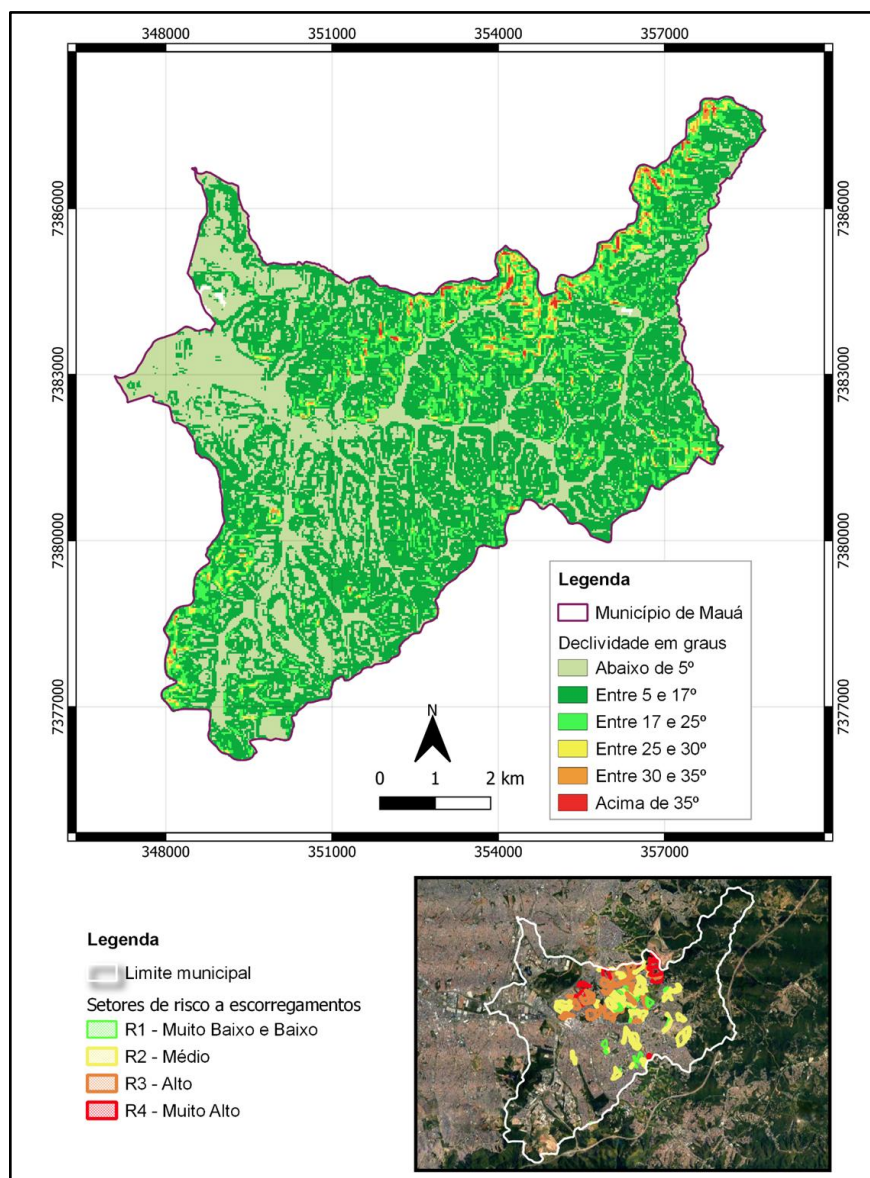
A segunda etapa do trabalho foi analisar dentro dos municípios as primeiras respostas de declividade, a partir do Modelo Digital de Superfície (MDS) utilizado pelo Instituto Geológico (2020) na época de mapeamento do trabalho com resolução de 5m, citado neste trabalho como MDS\_5m.

No município de Mauá, que possui 62 km<sup>2</sup>, identificou-se que 16,61 km<sup>2</sup> apresenta declividade abaixo de 5°, cerca de 30,75 km<sup>2</sup> possui declividade entre 5° e 17°, aproximadamente 7,9km<sup>2</sup> retém declividade entre 17° e 25°, declividades entre 25° e 30° ocupam cerca de 2,2km<sup>2</sup> e o restante, aproximadamente 1,5 km<sup>2</sup>, da área retém declividades acima de 30° (Figura 15).

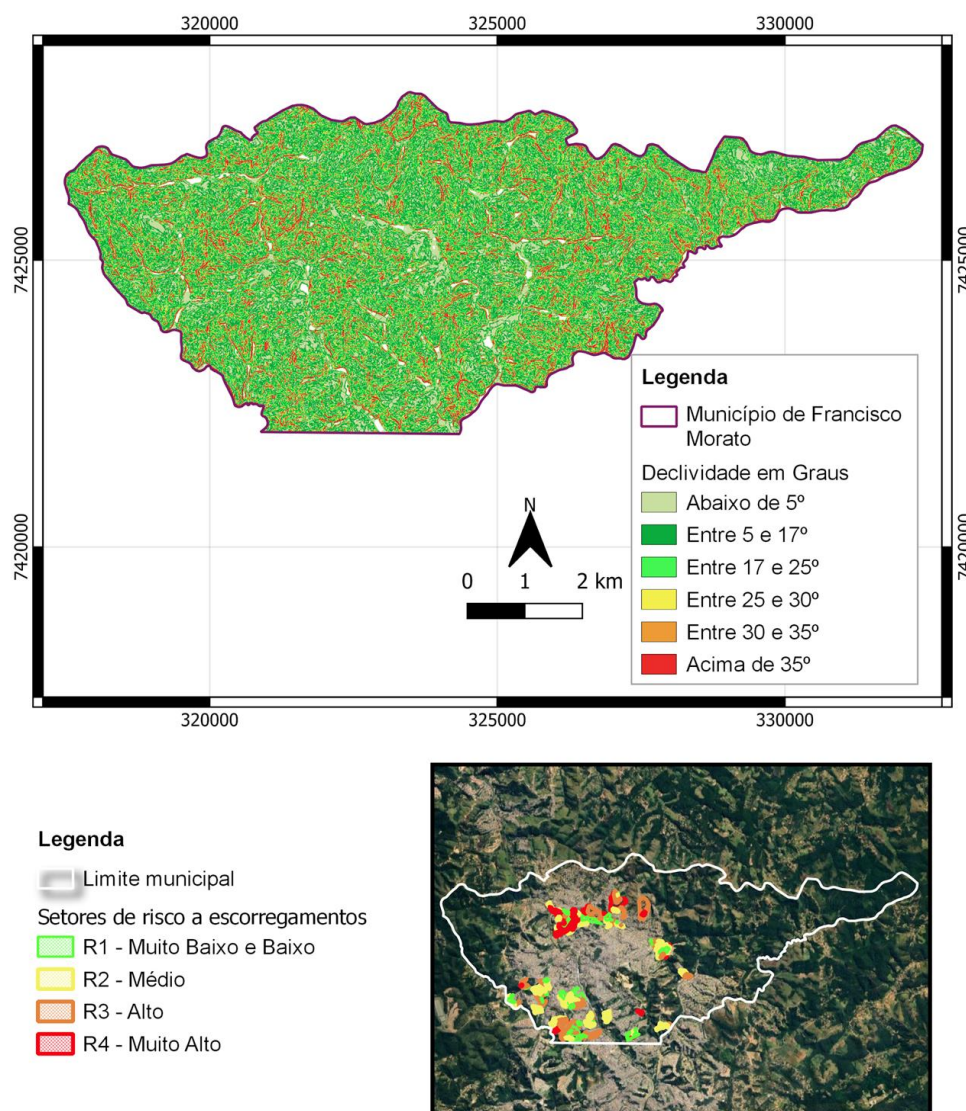
Em relação ao município de Francisco Morato que possui um total de 49 km<sup>2</sup> de extensão, cerca de 7,45 km<sup>2</sup> apresenta declividades abaixo de 5°, em torno de 22,22km<sup>2</sup> possui declividades entre 5° e 17°, declividades entre 17° e 25° ocupam por volta de 8,77km<sup>2</sup>, aproximadamente 3,48 km<sup>2</sup> possuem declividade entre 25° e 30°, declividades entre 30 e 35° retém 2,42km<sup>2</sup> e acima de 35° dispõem 4,2km<sup>2</sup> (Figura 16).

Os dados obtidos a partir do MDS com resolução de 5m por vezes podem representar situações mais pontuais, das quais se destacam a presença de árvores, representando uma fonte de erro.



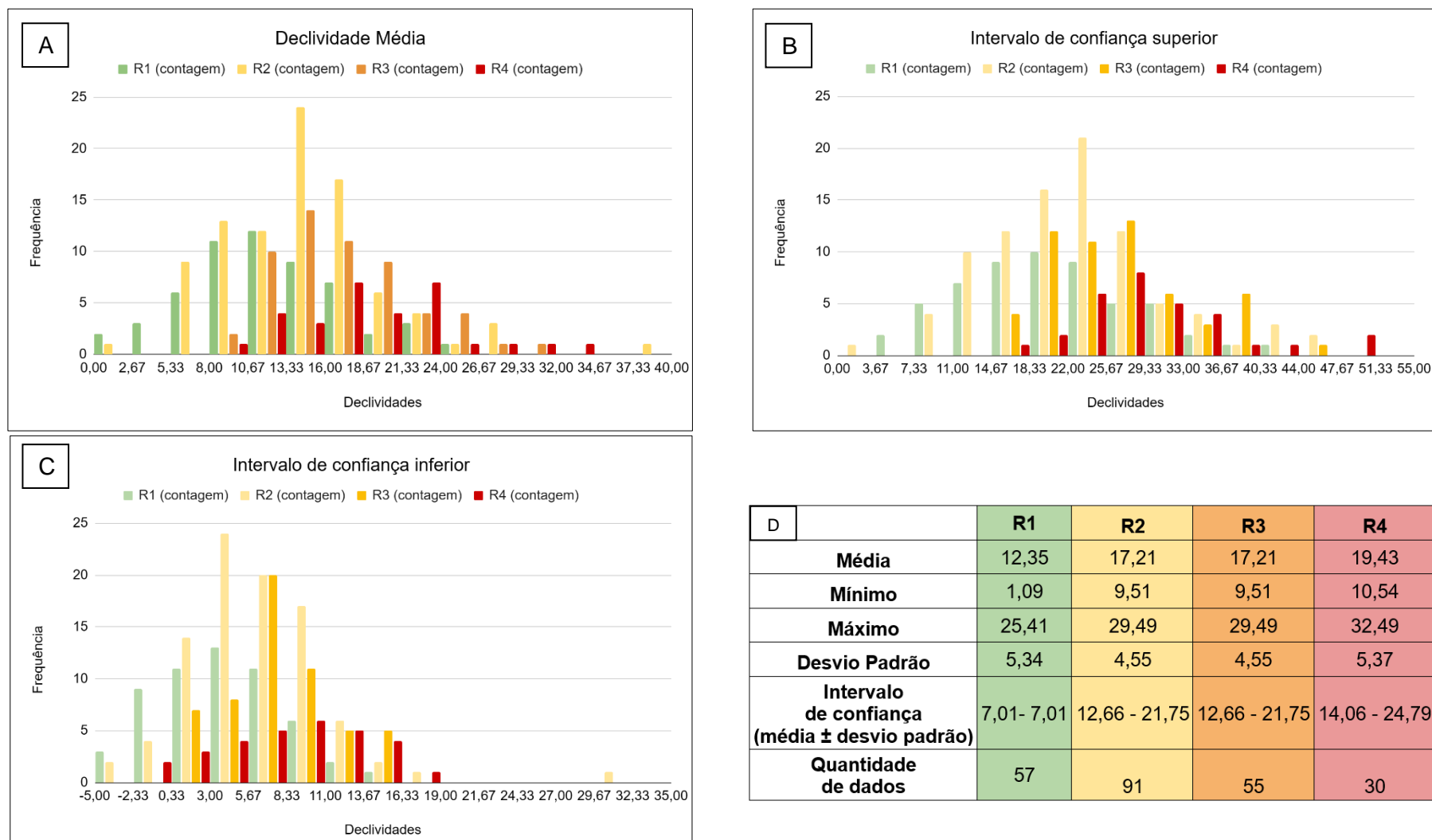


**Figura 15** - Mapa de declividade para o município de Mauá produzido com o MDS utilizado pelo Instituto Geológico et al.(2020) na época de mapeamento do trabalho com 5m de resolução.



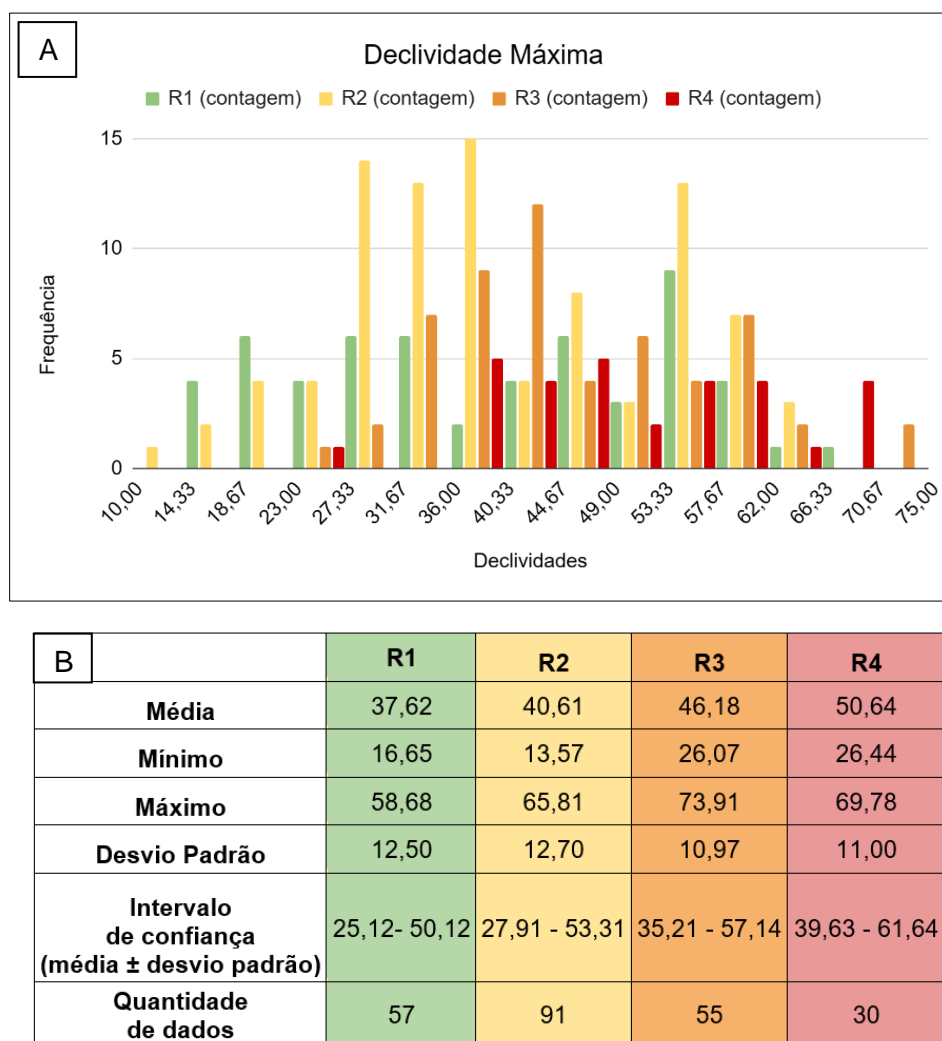
**Figura 16** - Mapa de declividade para o município de Francisco Morato produzido com o MDS utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020) na época de mapeamento do trabalho com 5m de resolução.

Como anteriormente, cada polígono de setor de risco foi utilizado para extrair uma amostra dos dados de declividade por setor. Os resultados da avaliação individualizada de cada setor de risco a escorregamento a partir do MDE\_5m pode ser observada na Figura 17. A representação gráfica dos valores de média de declividade encontram-se na Figura 17A. Tentando definir um intervalo de confiança de declividade em cada setor de risco, foram produzidos gráficos da média mais e menos o desvio padrão das declividades que podem ser observados respectivamente nas Figuras 17B e C, definidos respectivamente como intervalo superior e inferior. Os valores das médias da declividade de cada setor de risco são apresentados na Figura 17D.



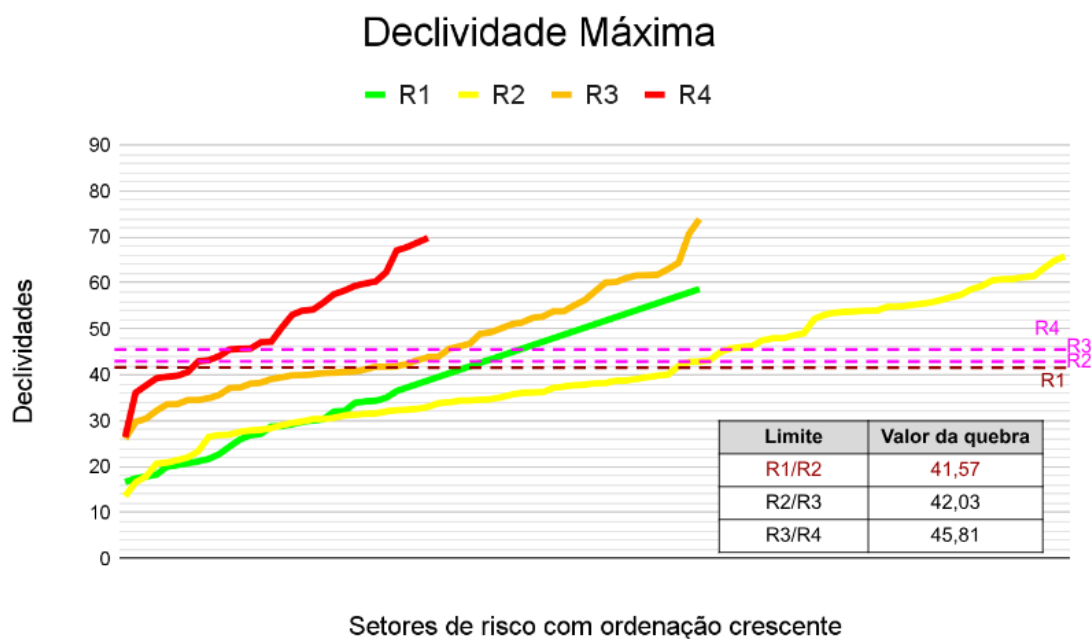
**Figura 17 - A** - Histograma dos dados de declividade média por setor de risco; **B** - Histograma dos dados de declividade média somada ao desvio padrão das declividades por setor de risco, definido como intervalo de confiança superior; **C** - Histograma dos dados de declividade média subtraída ao desvio padrão das declividades por setor de risco, definido como intervalo de confiança inferior; e **D** - Tabela com a variação estatística dos valores médios de declividade amostrada em cada setor de risco. Todos os resultados são derivados do MDE\_5m.

Como discutido anteriormente, pode ser relevante a observação das máximas declividades, uma vez que essa variável pode inclusive ser obtida independente de unidades de análise (setor de risco). Desta forma, considerando os valores de declividade máxima, os resultados da avaliação individualizada de cada setor de risco a escorregamento podem ser observados na Figura 18, onde a Figura 18A exibe a representação gráfica dos dados de declividade máxima de cada setor e a Figura 18B exibe os valores de média, mínima e máxima das declividades máximas em cada setor de risco.



**Figura 18 - A-** Histograma dos dados de declividade máxima dos setores de risco para o modelo digital de superfície de 5m. **B -** Tabela com a variação estatística das máximas de declividade dos setores de risco a escorregamento, produzido a partir do MDS\_5m.

Pretendendo confirmar os intervalos de confiança da declividade máxima de cada setor de risco a escorregamento, utilizou-se a fórmula de média ponderada. A partir dos valores das médias ponderadas das declividades máximas foram calculados os intervalos de limite, valores de quebra, entre os setores de risco, almejando estabelecer o ponto de suscetibilidade a ocorrência de movimentos de massa, a representação gráfica e a os valores desse cálculo podem ser observados na Figura 19.



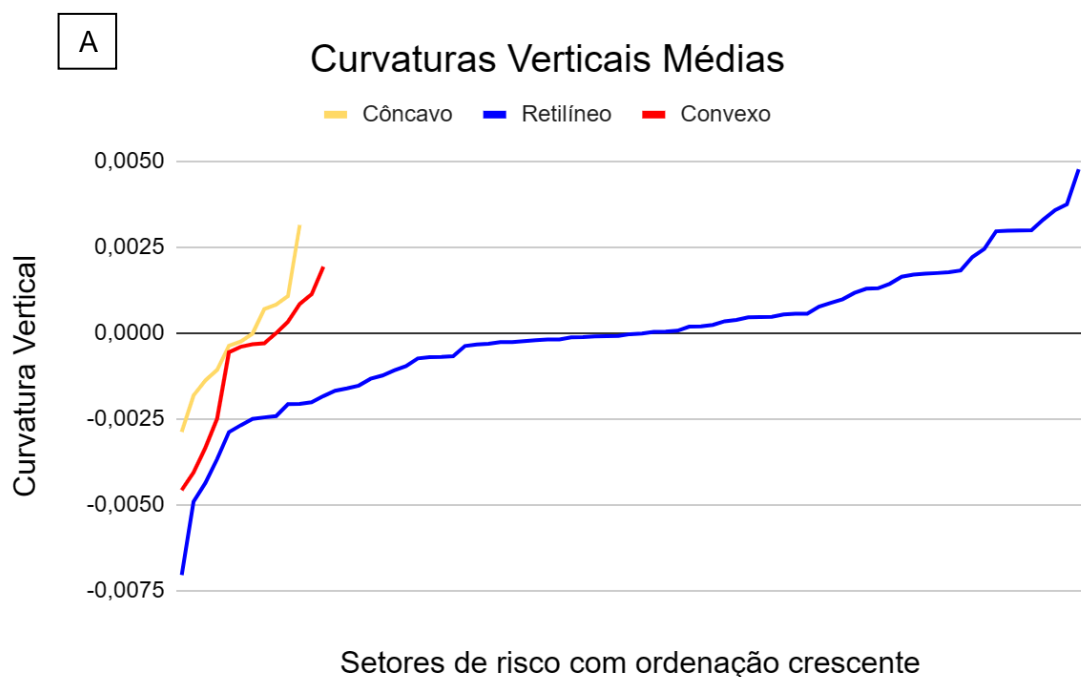
**Figura 19** – Representação gráfica dos dados de declividade máxima dos setores de risco com os valores de quebra de cada setor, baseados no MDS\_5m.

## 5.2. Curvatura vertical do terreno

O primeiro passo ao tentar definir a influência da curvatura vertical no terreno na suscetibilidade a escorregamento é determinar os intervalos de valores que definem as curvaturas côncavas, convexas e retilíneas. É preciso estabelecer o intervalo que representa a curvatura retilínea próximo a zero, uma vez definido este intervalo valores acima dele representam a curvatura convexa e abaixo a côncava.

Visando definir este intervalo a partir dos setores de risco a escorregamento, utilizou-se das definições de perfil de vertente do talude natural registradas em campo. Inicialmente todos os setores, independente da sua classe de risco, foram reclassificados em retilíneos, côncavos e convexas. Em seguida, cada um desses setores, foram comparados ao raster de curvatura vertical de terreno a partir dos dados orbitais e os valores numéricos de curvatura foram amostrados nos setores de risco.

Utilizando como base o MDE\_30m obteve-se os resultados para cada classificação de curvatura vertical, dos quais os valores dessa análise podem ser observados na Figura 20, onde são exibidos de forma gráfica na Figura 20A e os valores de média, máximo, mínimo, desvio padrão e intervalos de confiança calculados para cada setor são apresentados na Tabela 20B.



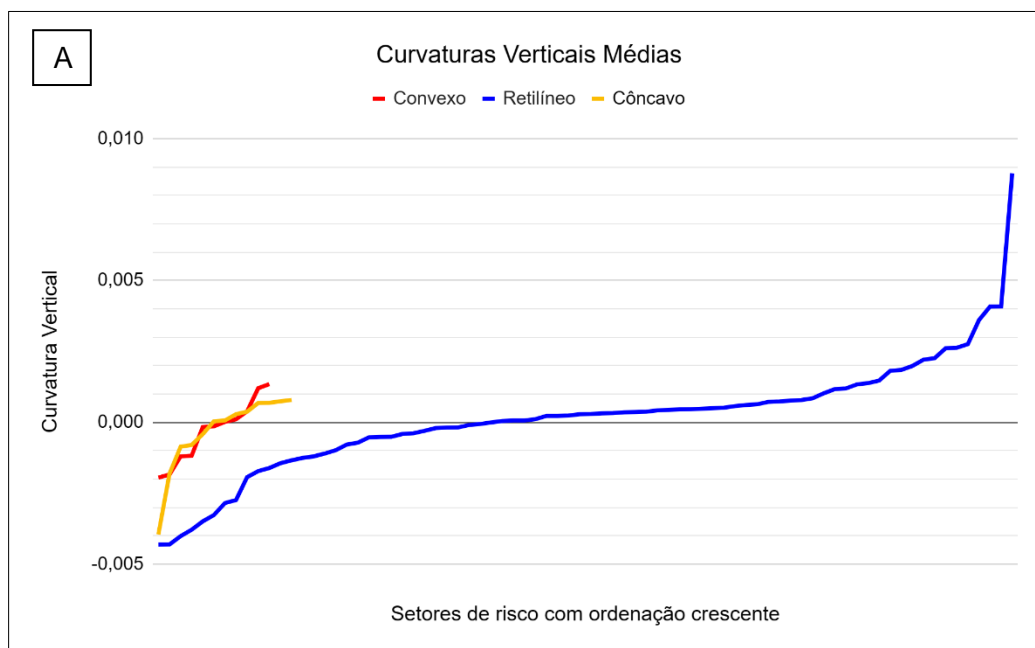
**B**

	Côncavo	Retilíneo	Convexo
<b>Média</b>	-0,00091	-0,00002	-0,00019
<b>Mínimo</b>	-0,00457	-0,00704	-0,00288
<b>Máximo</b>	0,00193	0,00476	0,00314
<b>Desvio Padrão</b>	0,00205	0,00201	0,00163
<b>Intervalo de confiança (média <math>\pm</math> desvio padrão)</b>	-0,00296 a 0,00114	-0,00020 a 0,00199	-0,00182 a 0,00145
<b>Quantidade de dados</b>	13	78	11

**Figura 20 - A** - Representação gráfica dos valores de curvatura obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento e diferenciados por classificação de curvatura, a partir do MDE\_30m; **B** - Valores das médias dos setores de risco a escorregamento classificados pela curvatura, a partir do MDE\_30m.

O mesmo procedimento de análise foi realizado para o modelo digital de superfície (MDS) com resolução espacial de 5m para a região Metropolitana do Estado de São Paulo, utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020) durante o projeto. A partir do modelo digital foi confeccionado o mapa de curvatura e obtidos valores de média de curvatura dentro de cada classificação, esses valores podem ser observados de forma gráfica na Figura 21A. Os resultados de média, máximo, mínimo e desvio padrão calculados são apresentados na Figura 21B.



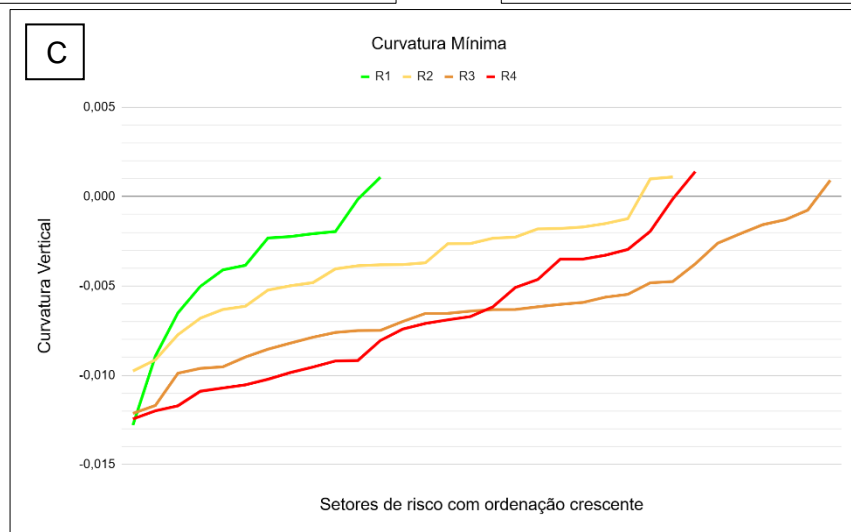
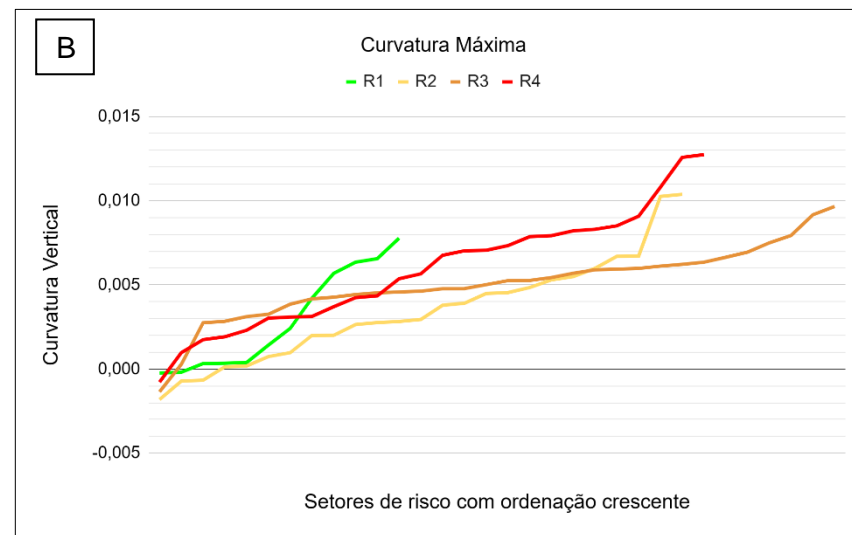
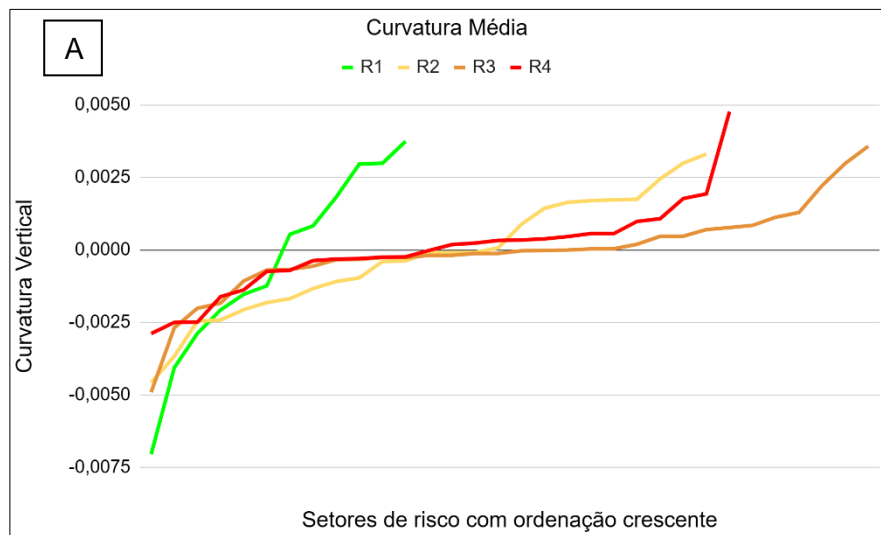


**B**

	Côncavo	Retilíneo	Convexo
<b>Média</b>	-0,00032	0,00016	-0,00031
<b>Mínimo</b>	-0,00395	-0,00431	-0,00195
<b>Máximo</b>	0,00079	0,00878	0,00135
<b>Desvio Padrão</b>	0,00134	0,00200	0,00111
<b>Intervalo de confiança (média <math>\pm</math> desvio padrão)</b>	-0,00017 a 0,00102	-0,00184 a 0,00251	-0,00142 a 0,00080
<b>Intervalo de confiança de 67%</b>	-0,00068 a 0,00004	-0,00006 a 0,00038	-0,00064 a 0,00002
<b>Quantidade de dados</b>	13	78	11

**Figura 21 - A** - Representação gráfica dos valores de curvatura obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento e diferenciados por classificação de curvatura, a partir do modelo digital de superfície utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020) com resolução de 5m. **B** - Valores das médias dos setores de risco a escorregamento classificados pela curvatura. Resultados obtidos a partir do MDS\_5m.

Avaliando a necessidade de uma abordagem que não levasse em consideração a classificação dos intervalos de curvatura vertical para a análise de influência e o comportamento da curvatura a suscetibilidade, partiu-se para uma avaliação individualizada, onde cada polígono foi utilizado para extrair uma amostra dos dados de curvatura no setor de risco, oriundos da morfometria dos MDEs utilizados. Visando determinar a influência da curvatura na suscetibilidade ao risco a escorregamento, as análises centralizaram-se para cada classificação de curvatura vertical (côncava, convexa e retilínea) em cada um dos setores de risco de forma contínua. Os dados derivados do modelo de elevação Copernicus com resolução de 30m foram analisados primeiro, a representação gráfica dos valores de curvatura média, máxima e mínima em cada setor de risco encontra-se respectivamente nas Figuras 22A, 22B e 22C. Os resultados de máxima, média, mínima e desvio padrão calculados são apresentados respectivamente na Figuras 23A, 23B e 23C.



**Figura 22 - A** - Representação gráfica dos valores de médias de curvatura obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento; **B** - Representação gráfica dos valores de máxima curvatura obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento; e **C** - Representação gráfica dos valores de mínimas de curvatura obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento. Resultados obtidos a partir do MDE\_30m.



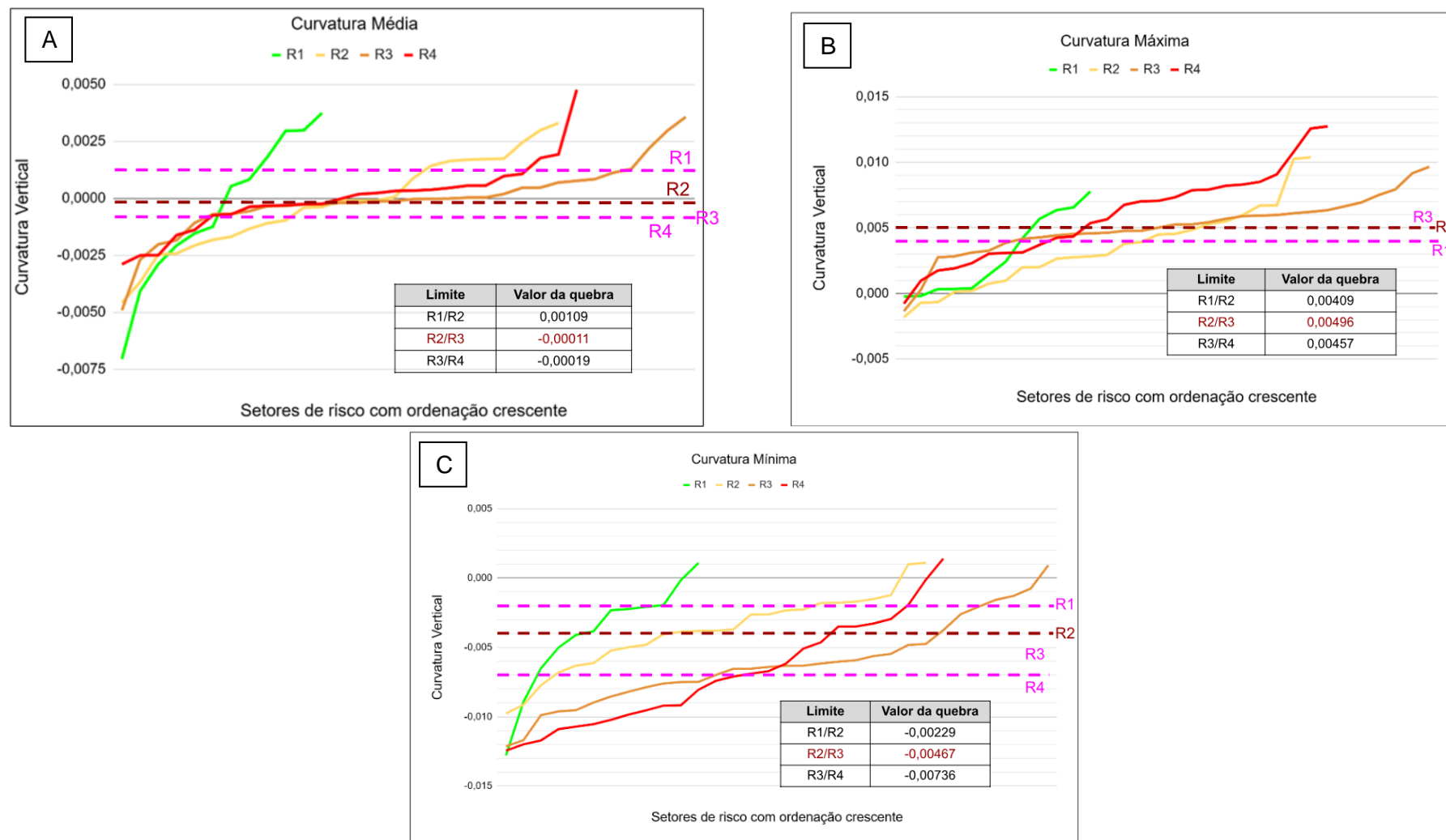
A		R1	R2	R3	R4
Média		-0,0005	-0,00021	-0,00005	-0,00001
Mínimo		-0,0070	-0,00457	-0,00490	-0,00288
Máximo		0,0037	0,00330	0,00357	0,00476
Desvio Padrão		0,0032	0,00204	0,00154	0,00155
Intervalo de confiança (média $\pm$ desvio padrão)		-0,0037 a 0,0027	-0,00225 a 0,00183	-0,00159 a 0,00149	-0,00155 a 0,00154
Quantidade de dados		12	25	32	26

B		R1	R2	R3	R4
Média		0,0029	0,00346	0,00506	0,00588
Mínimo		-0,0002	-0,00181	-0,00135	-0,00078
Máximo		0,0078	0,01038	0,00966	0,01274
Desvio Padrão		0,0030	0,00314	0,00220	0,00350
Intervalo de confiança (média $\pm$ desvio padrão)		-0,0001 a 0,0059	0,00031 a 0,00660	0,00285 a 0,00726	0,00239 a 0,00938
Quantidade de dados		12	25	32	26

C		R1	R2	R3	R4
Média		-0,0041	-0,00384	-0,00619	-0,00701
Mínimo		-0,0128	-0,00976	-0,01214	-0,01245
Máximo		0,0011	0,00110	0,00091	0,00140
Desvio Padrão		0,0039	0,00262	0,00308	0,00381
Intervalo de confiança (média $\pm$ desvio padrão)		-0,0079 a -0,0002	-0,00661 a -0,00108	-0,00928 a -0,00311	-0,01082 a -0,00321
Quantidade de dados		12	25	32	26

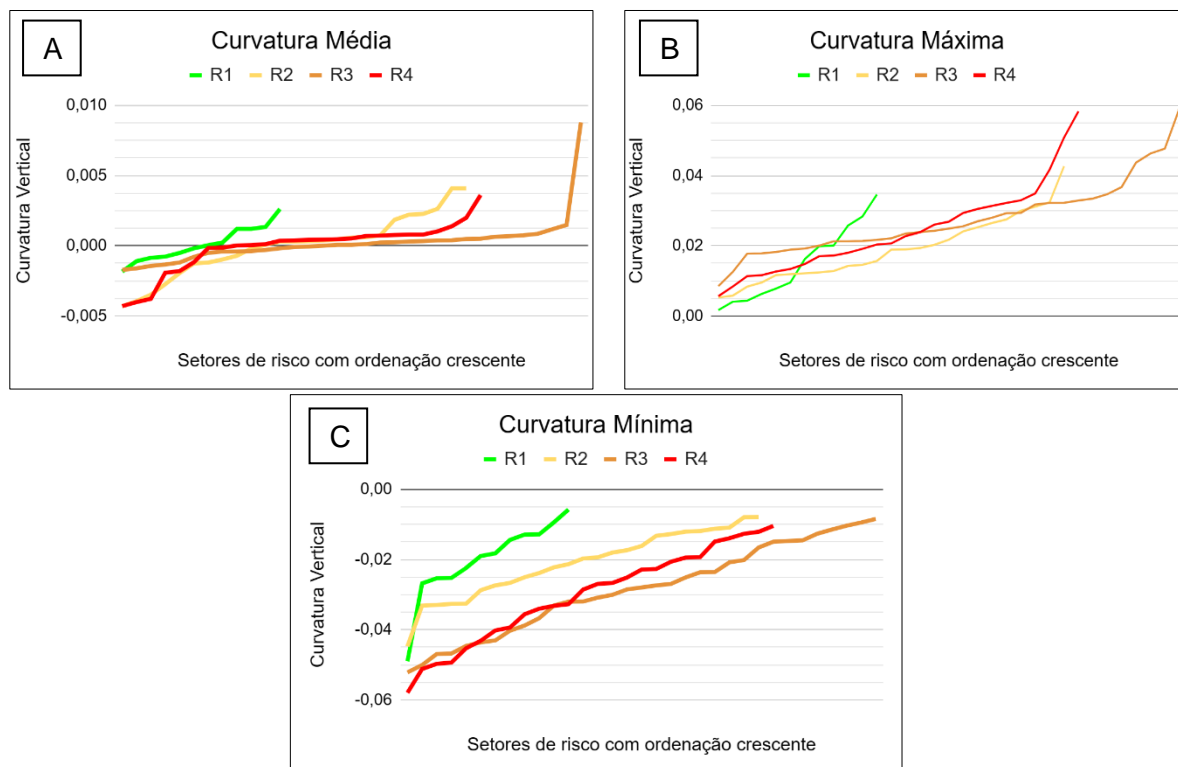
**Figura 23 - A** - Variação estatística das médias de curvatura dos setores de risco a escorregamento; **B** - Variação estatística das máximas de curvatura dos setores de risco a escorregamento; e **C**- Variação estatística das mínimas de curvatura dos setores de risco a escorregamento. Resultados obtidos a partir do MDE\_30m.

Pretendendo confirmar os intervalos de confiança das curvaturas de cada setor de risco a escorregamento, utilizou-se a fórmula de média ponderada. A partir dos valores das médias ponderadas das curvaturas verticais foram calculados os intervalos de limite, valores de quebra, entre os setores de risco, a representação gráfica e os valores desse cálculo podem ser observados na Figura 24A para os dados de curvatura vertical média, Figura 24B para os valores de curvatura vertical máxima e a Figura 24C expõe os resultados dos valores de curvatura vertical mínima.



**Figura 24 - A** -Variação estatística das médias de curvatura vertical dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDE\_30m; **B** - Variação estatística das máximas de curvatura vertical dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDE\_30m; e **C** - Variação estatística das mínimas de curvatura vertical dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDE\_30m.

Empregando o Modelo Digital de Superfície (MDS) utilizado pelo Instituto Geológico (2020) na época de mapeamento do trabalho, o processo foi repetido buscando entender a resposta dentro dos setores com uma resolução de 5m. A representação gráfica dos resultados de curvatura vertical média, máxima e mínima em cada setor de risco encontra-se respectivamente nas Figuras 25A, 25B e 25C. Os resultados de média, máximo, mínimo e desvio padrão calculados são apresentados nas Figuras 26A, 26B e 26C.



**Figura 25 - A** - Representação gráfica dos valores de média de curvatura vertical obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento; **B** - Representação gráfica dos valores de máxima curvatura vertical obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento; e **C** - Representação gráfica dos valores de mínimas de curvatura obtidos dentro dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDS\_5m.

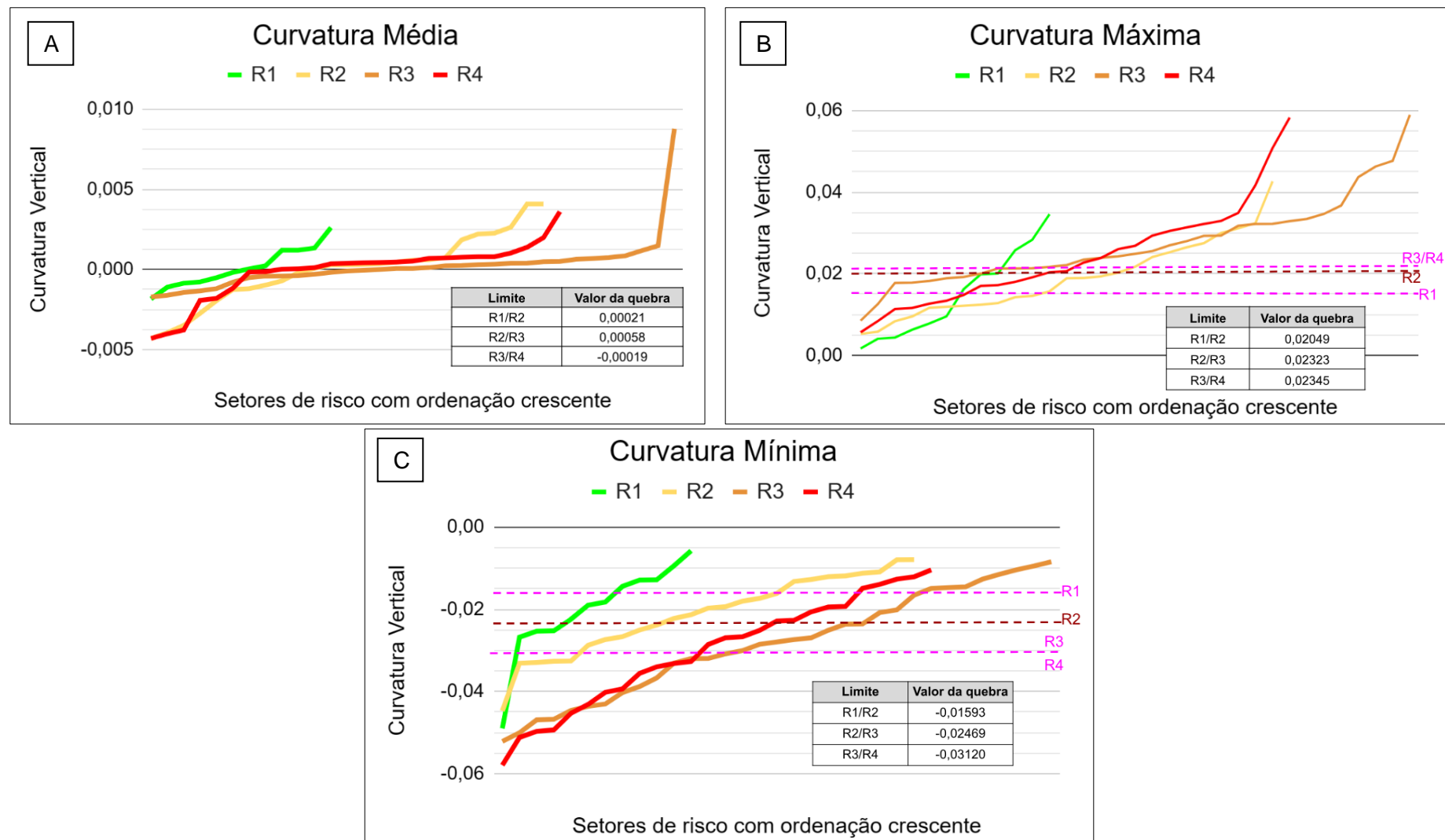
A	R1	R2	R3	R4
Média	0,0001	0,0000011	0,00021	-0,00011
Mínimo	-0,0018	-0,004309	-0,00172	-0,00430
Máximo	0,0026	0,00409	0,00878	0,00360
Desvio Padrão	0,0013	0,00221	0,00172	0,00180
Intervalo de confiança (média $\pm$ desvio padrão)	-0,0012 a 0,0014	-0,00221 a 0,00222	-0,00151 a 0,00193	-0,00191 a 0,00169
Quantidade de dados	12	25	32	26

B	R1	R2	R3	R4
Média	0,0149	0,0189030	0,02747	0,02428
Mínimo	0,0017	0,005242	0,00848	0,00563
Máximo	0,0346	0,04264	0,05894	0,05827
Desvio Padrão	0,0108	0,00927	0,01056	0,01266
Intervalo de confiança (média $\pm$ desvio padrão)	0,0040 a 0,0257	0,00963 a 0,02817	0,01691 a 0,03802	0,01161 a 0,03694
Quantidade de dados	12	25	32	26

C	R1	R2	R3	R4
Média	-0,0201	-0,0212008	-0,02844	-0,03032
Mínimo	-0,0490	-0,044750	-0,05216	-0,05796
Máximo	-0,0058	-0,00792	-0,00844	-0,01044
Desvio Padrão	0,0113	0,00949	0,01287	0,01358
Intervalo de confiança (média $\pm$ desvio padrão)	-0,0314 a -0,0088	-0,03069 a -0,01171	-0,04131 a -0,01556	-0,04390 a -0,01674
Quantidade de dados	12	25	32	26

**Figura 26 - A-** Variação estatística das médias de curvatura vertical dos setores de risco a escorregamento; **B -** Tabela com variação estatística das máximas de curvatura dos setores de risco a escorregamento; e **C -** Variação estatística das mínimas de curvatura dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDS\_5m.

A fim de confirmar os intervalos de confiança das curvaturas de cada setor de risco a escorregamento, utilizou-se a fórmula de média ponderada. A partir dos valores das médias ponderadas das curvaturas verticais foram calculados os intervalos de limite, valores de quebra, entre os setores de risco, a representação gráfica e a os valores desse cálculo podem ser observados na Figura 27A para os dados de curvatura vertical média, Figura 27B para os valores de curvatura vertical máxima e a Figura 27C expõe os resultados dos valores de curvatura vertical mínima.



**Figura 27 - A** - Variação estatística das médias de curvatura vertical dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDS\_5m; **B** - Variação estatística das máximas de curvatura vertical dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDS\_5m.declividade; e **C** - Variação estatística das mínimas de curvatura vertical dos setores de risco a escorregamento. Produzido a partir de MDS\_5m.

## **6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Durante o projeto optou-se por trabalhar os dados dos municípios de Francisco Morato e Mauá em conjunto de forma proposital, uma vez que se teve como objetivo dimensionar exatamente a influência da declividade e da curvatura, em um amplo aspecto, sem levar em consideração diferenças, por exemplo do contexto geológico em núcleos urbanos.

Entretanto, destaca-se que o trabalho tem diretrizes qualitativas sobre as variáveis analisadas, ou seja, entende-se que um mesmo setor de risco é uma área com um conjunto de variáveis. Para a sua análise é válido uma percepção da área e não apenas do talude, além de refletir sobre fatores que possam influenciar suas movimentações, como cortes, qualidade do maciço, fragilidade da construção e entre outros. Ou seja, os valores aqui determinados servem como uma primeira interpretação de áreas abrangentes e uma interpretação direta necessita de uma avaliação em conjunto dos fatores que induzem a sensibilidade ao risco.

### **6.1. Interpretação e discussão dos resultados de declividade**

A análise dos mapas de declividade mostra que em ambos os municípios mais da metade da área territorial apresenta valores inferiores a 17° de declividade, referente a quebra de 30% sugerida na Lei Lehmann de parcelamento do solo (Lei 6.766, de 19.12.1979). Entretanto, ao analisarmos os valores de declividade individualizados por setores de risco, notamos que embora nos setores existam declividades abaixo de 5°, na setorização de risco a escorregamentos valores como este tendem a não condicionar o risco diretamente, uma vez que se apresentam majoritariamente em riscos baixos (R1), como pode ser observado na Figura 10 e 12A.

A análise dos dados organizados no histograma mostra que, considerando a declividade máxima, iniciam-se ocorrências de: Risco baixo (R1) de 5° a 29°, de risco médio (R2) 5° a 35°, riscos altos e muito altos (R3 e R4) de 15 a 45°, dados derivados da análise do MDE\_30m.

Fica sugerido que em um MDE com resolução de 30m, declividades abaixo de 17° adotados na Lei Lehmann de parcelamento do solo, são de fato uma classe de baixa suscetibilidade, mesmo sabendo que nessas condições é comum ter cortes de talude para a instalação das moradias, sendo que dos 232 setores observados, apenas 7 (3%) ficaram menores que a classe 18,33 do histograma (Figura 12A). Continuando a análise, os de risco médio (R2) se concentram a partir de 17° com a maior parte dos dados abaixo de 25°.

Enquanto a relevância de ocorrência dos R4, e pico de ocorrência dos R3 ficam por volta da classe 25° e superior, corroborando que a faixa acima de 17 até 25° como uma suscetibilidade média de ocorrências.

A faixa até 30° marca o fim das ocorrências de setores de risco baixo (R1), essa informação mostra que a partir desse limite as ocorrências já requerem a gestão, sendo de riscos esperados médios e altos (R2 e R3) seja dos ocorridos riscos muito altos (R4).

Acima dos 30° é possível notar a ampla propensão a risco muito alto (R4), que marca as ocorrências registradas. As correlações foram importantes para mostrar a aplicabilidade da utilização da declividade do MDE com resolução de 30m, em mapas de suscetibilidade de escorregamento, como instrumento de orientação para definir alvos de mapeamento de detalhe.

Uma vez que os dados de declividade máxima do MDE com resolução de 30m foram validados à aplicação em suscetibilidade de escorregamento, uma análise da variabilidade estatística da declividade máxima dos setores de riscos, foram organizados para a análise da aderência. Desta forma, interpretando os intervalos de confiança (média  $\pm$  desvio padrão) expressados pela declividade máxima (Figura 12B), nota-se que os setores de risco baixo (R1) e médio (R2) apresentam pequenas variações em seus intervalos, cerca de 4°. Sendo assim, ao avaliar setores com médias de declividade máximas entre 16° e 24° não é possível diferenciar apenas com estes valores. Nos setores de risco alto (R3) e muito alto (R4), também existe uma variação de cerca de 4° entre os intervalos de confiança (média  $\pm$  desvio padrão) expressos pela declividade máxima de cada setor (Figura 12B). Portanto, ao interpretar dados de setores com médias de declividade máximas no intervalo de 23° e 33°, não é possível diferenciá-los.

A partir da média das declividades máximas pode-se interpretar que comumente a média das máximas de um setor de risco baixo (R1) encontra-se entre os 18° e a média das máximas de um setor de risco médio (R2) entre os 22°. Em relação ao risco alto (R3), a partir das médias das declividades máximas pode-se definir que geralmente a média máxima varia no entorno de 26°, enquanto um setor de risco muito alto (R4), possui médias máximas de declividade por volta dos 29°.

Porém, a partir da média ponderada realizada para definir os intervalos de quebra dos setores de risco (Figura 14), pode-se dizer que o risco baixo (R1) está atrelado a declividades abaixo de 21°, enquanto o risco médio (R2) varia entre os valores de 21° a 23°. Isso mostra que, ao utilizar esses dados na suscetibilidade de escorregamento, valores de 17° são de fato referentes a baixa suscetibilidade, enquanto os valores até 23° correspondem à média suscetibilidade. Com base nas quebras, ficou estabelecido que declividades entre 23° e 26,5° podem estar associadas a riscos altos (R3) e o risco muito alto apresenta declividades acima de 26,5°.

Esses números permitem a proposição de classes de alta suscetibilidade acima de 23°, para processos esperados e já ocorridos, propõe-se declividades acima de 27°. O que nem uma situação de gestão de recursos para o apontamento de áreas de detalhamento em campo, pode proporcionar uma classe de suscetibilidade de escorregamentos muito alta.

Cabe ressaltar que os valores apresentados não têm como propósito servir como marco em relação a mecânica do solo ou para dar diretrizes sobre a atitude de talude de corte ou natural individualizado. Mas sim, como um valor orientativo, de como a RMSP faz uso da área

em situações de urbanização, mostrando que o MDE com resolução de 30m, representa pixels que mostram áreas de 900m<sup>2</sup>, e como pode se ajustar na previsibilidade de ocorrência de escorregamentos em áreas urbanas, que condicionem as moradias ao risco.

Em relação aos dados obtidos de declividade a partir do modelo digital de superfície de 5m, avalia-se a partir dos intervalos de confiança (média  $\pm$  desvio padrão) dos dados de declividade máxima em todos os setores de risco apresentam sobreposição (Figura 18B), onde declividades entre 35° e 53° podem estar representar todos os setores. Porém, a partir da média ponderada, realizada para definir os intervalos de quebra dos setores de risco (Figura 19), pode-se dizer que o risco baixo (R1) está atrelado a declividades abaixo de 41°, enquanto o risco médio (R2) varia entre os valores de 41° a 42°, enquanto as declividades acima de 46° podem estar associadas a riscos alto (R3) e a riscos muito alto. Esses números permitem a proposição de classes de alta suscetibilidade acima de 42°, para processos esperados, e acima de 46° variando áreas com movimentos já ocorridos, essa avaliação é válida quando é utilizado um modelo digital de superfície com resolução de 5m.

A boa aplicabilidade do MDE com resolução de 30m nessa correlação está associada ao entendimento de algumas limitações de um MDS, que pode representar moradias, muros e árvores, ao abordar resolução de 5m (área de 25m<sup>2</sup>). No entanto, ao analisar os dados provenientes do MDS\_5m, nota-se a presença de valores mais elevados, como ilustrados na Figura 17, onde, por exemplo, as médias de declividade no setor de risco baixo (R1) passam a ser de declividades de 37,6°, antes de 18° no MDE\_30m. Isso se dá, também devido a uma melhora da resolução em seis vezes em relação ao MDE\_30m, visto que ao aumentar a resolução do modelo implica em um aumento dos valores de declividade.

## **6.2. Interpretação e discussão dos resultados da curvatura vertical**

Nas primeiras etapas do trabalho, refletiu-se sobre a necessidade de criação de um intervalo de valores em volta de zero que definisse a curvatura vertical retilínea, uma vez que o zero absoluto é raro. Usando intervalos da bibliografia como o de Valeriano (2003), que apresenta valores de  $-0,55\% \ 100 \ m^{-1}$  a  $+ 0,55\% \ 100 \ m^{-1}$  como curvaturas retilíneas, observou-se a grande quantidade de relevos retilíneos, que foi associada a falta de ajuste dos intervalos de classificação das curvaturas dentro do ambiente e resolução trabalhada.

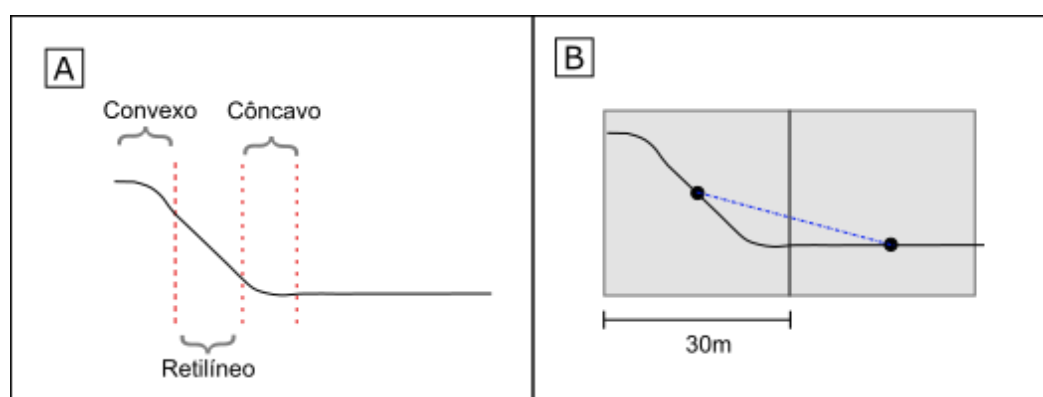
Na tentativa de delimitar um intervalo, utilizou-se dos setores de risco mapeados em campo pelo Instituto Geológico et al (2020) para correlação e o MDE\_30m. A partir dos intervalos de confiança (média  $\pm$  desvio padrão), observou-se uma justaposição nos valores dos setores classificados como côncava, convexo e retilíneo (Figura 20A).

Esperava-se que os setores classificados como curvatura côncavas apresentassem médias positivas, os setores convexos apresentassem médias negativas e os valores retilíneos se aproximassem de zero com valores negativos e positivos. Embora analisando os valores de curvatura vertical média, os valores para a curvatura vertical convexos tenham sido satisfatórios, os setores classificados como côncavos apresentam majoritariamente valores



negativos, o que contradiz a literatura. Em relação a curvatura retilínea, esta está sobrepondo os valores de curvatura convexa (Figura 20B). Inferiu-se então o problema de geração de intervalos e a grande quantidade de relevos retilíneos gerados utilizando definições de valores de curvatura vertical retilínea à resolução do pixel para a produção do mapa.

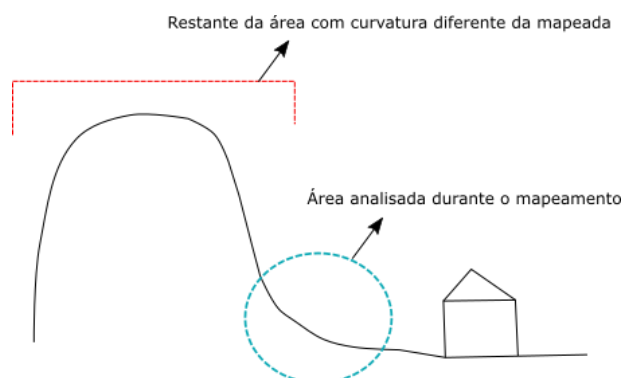
A Figura 28 apresenta um esboço da captura da elevação pelos sensores, e como ocorre a interpretação, do ajuste da resolução comparado com a projeção horizontal da encosta. O cálculo da curvatura é baseado em uma equação de linha, quando os dados saem dessa linha conhecida é medido o desvio, quando positivo são caracterizados com relevos côncavos e convexos como negativos, na comparação entre diferenças altimétricas ao ponto da célula (pixel) e caso apresentem os mesmos valores o relevo é classificado como curvatura vertical retilíneo. Como um mesmo talude apresenta mais de um tipo de curvatura vertical, a resolução do pixel pode influenciar na aquisição de dados, uma vez que a resolução o tamanho do pixel pode ser maior do que a do talude analisado, como é representado pelos quadrados cinzas na Figura 28B, o relevo pode ser considerado retilíneo, uma vez que o pixel não consegue notar variações neste terreno.



**Figura 28** - Esboço de representação de aquisição de dados de curvatura baseado na resolução do pixel do modelo digital de elevação com resolução de 30m.

Avaliando os intervalos de confiança, obtidos a partir do modelo digital de superfície utilizado pelo Instituto Geológico et al. (2020) com resolução de 5m (Figura 21), esperava-se que fosse possível definir os intervalos de classificação das curvaturas verticais. Entretanto, os valores apresentaram a mesma geometria do modelo digital de elevação com resolução de 30m, com sobreposição dos intervalos.

Outro fator a ser discutido, é a escala de mapeamento dos taludes, durante o mapeamento de campo pode ser ter sido analisada apenas uma parte do talude. Como exemplo o esboço da Figura 29, mesmo que o relevo seja de uma geometria de curvatura convexa, o mapeamento pode ter sido realizado apenas no pé do talude, que segundo o profissional, naquele ponto apresentava geometria retilínea ou convexa.



**Figura 29** - Esboço de talude fictício mapeado.

A partir das dificuldades em determinar valores que definissem a classificação de curvatura vertical retilínea, optou-se por outra análise com intuito supor a fragilidade interna do maciço em compor o risco, analisou-se em um amplo aspecto a influência da curvatura vertical baseada nos setores de risco a escorregamentos de terra.

Inicialmente avaliando os resultados da curvatura vertical dos setores de risco derivados do MDE\_30m, observa-se partir dos intervalos de confiança (média  $\pm$  desvio padrão) da curvatura vertical média, máxima e mínima, que os setores de risco baixo (R1) e médio (R2) possuem sobreposição dos intervalos, assim como os setores de risco alto (R3) e muito alto (R4) (Figuras 22 e 23). Entretanto, essa sobreposição pode estar relacionada à metodologia de campo, pois os setores de risco são baseados na evolução do processo de escorregamento. Dessa forma, os setores de risco baixo (R1) e médio (R2) podem apresentar essa sobreposição por serem parecidos dentro da classificação de campo. A mesma ideia se aplica para a sobreposição dos setores de risco alto (R3) e muito alto (R4), o que os difere é o avanço de instalação do processo, em que um o processo está completamente instalado e outro ainda.

Entretanto um limite importante a ser definido é em relação ao limite do setor de risco médio (R2) e alto (R3), no qual um apresenta geometria para a ocorrência e o outro processo em andamento. Pretendendo definir estes limites, chamados de “valores de quebra”, utilizou-se a média ponderada. A partir dos resultados obtidos das médias das curvaturas verticais, apresentados na Figura 24A, observou-se que a propensão ao risco tende a aumentar quanto menor o índice de curvatura, onde curvaturas superiores a  $0,00011\text{m}^{-1}$  podem indicar propensão aos riscos baixos (R1) e médios (R2) e inferiores a este valor podem indicar propensão a riscos altos (R3) e muito alto (R4). O mesmo ocorre quando analisamos os dados de curvatura vertical mínima (Figura 24C), no qual curvaturas verticais superiores a  $-0,007\text{m}^{-1}$  podem indicar aptidão a riscos baixos (R1) e médios (R2) e inferiores a este valor podem indicar predisposição a riscos altos (R3) e muito alto (R4). Entretanto os resultados das curvaturas verticais máximas (Figura 24B), indicam o inverso, onde quanto maior o índice de curvatura vertical, maior a suscetibilidade a escorregamentos, onde valores superiores a  $0,00496\text{m}^{-1}$  podem indicar propensão alta (R3) a muito alta (R4) e inferiores risco baixo (R1)

e médio (R2).

Avaliando os resultados da curvatura vertical dos setores de risco derivados do MDS\_5m, observa-se partir dos intervalos de confiança (média  $\pm$  desvio padrão) da curvatura vertical média, máxima e mínima, que os setores de risco baixo (R1) e médio (R2) possuem sobreposição dos intervalos, assim como os setores de risco alto (R3) e muito alto (R4) (Figuras 25 e 26). Entretanto, como mencionada anteriormente essa sobreposição pode estar relacionada à metodologia de campo

Seguindo a mesma lógica de análise realizada para o MDE\_30m, pretendendo definir os limites entre os setores de risco para o MDS\_5m utilizou-se a média ponderada. Os intervalos de curvatura vertical mínima (Figura 27C) indicaram que a suscetibilidade a escorregamentos tende a aumentar quanto menor o índice de curvatura, onde curvaturas superiores a  $0,0153\text{m}^{-1}$  podem indicar propensão a riscos baixos (R1), índices de curvatura entre  $0,0153\text{m}^{-1}$  a  $-0,02469\text{m}^{-1}$  podem apontar predisposição a riscos médios (R2), valores de curvatura entre  $-0,02469\text{m}^{-1}$  a  $-0,03120\text{m}^{-1}$  podem expressar riscos altos (R3) e inferiores a  $-0,03120\text{m}^{-1}$  podem indicar risco muito alto (R4). Os dados de curvatura vertical máxima indicaram o inverso, no qual quanto maior o índice de curvatura vertical, maior a suscetibilidade a deslizamentos (Figura 27B), com valores superiores a  $0,02345\text{m}^{-1}$  se relacionam a riscos altos (R3) e muito altos (R4) e inferiores a riscos baixos e médios. Os intervalos dos limites dos setores referentes a curvatura média não apresentaram resultados significativos, uma vez que apresenta um índice de curvatura crescente junto a suscetibilidade, entretanto o limite de R3 e R4, acaba sendo inferior a R1 e R2.

Essa característica das mínimas e médias das curvaturas verticais, de quanto maior o índice de curvatura, maior a suscetibilidade e o inverso nas curvaturas verticais máximas, onde quanto maior o índice de curvatura vertical, maior a suscetibilidade, podem estar relacionadas à geometria do talude. Como retratado na Figura 28A, um único talude pode conter as três classificações de curvatura vertical, esse fator pode influenciar nos dados obtidos, onde os dados de curvatura vertical mínima e média podem ser compatíveis aos dados das bases dos taludes e aos dados de curvatura vertical máximas aos topos.

De acordo com Ohlmacher (2007), as encostas planas são as mais suscetíveis a deslizamentos, seguido pelos relevos côncavos. Desta forma, avaliando a suscetibilidade, os valores próximos a zero deveriam estar diretamente ligados aos riscos alto (R3) e muito alto (R4). Entretanto, os dados desta monografia apontam, na maioria dos casos, que quanto menor o índice de curvatura vertical maior a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, comparando as curvaturas convexas como as mais suscetíveis ao risco.

Destaca-se que existem poucas bibliografias que tratam sobre curvatura vertical, ainda menos sobre a suscetibilidade desta a escorregamentos, uma das dificuldades encontradas durante a construção do trabalho de conclusão de curso. Entretanto, baseado na literatura sabe-se que um relevo de curvatura vertical côncava pode estar associado a uma área na

qual já ocorreram escorregamentos, derivado deste evento a vertente passa a apresentar geometria côncava. Dessa forma, podem-se associar os resultados de risco muito alto (R4), tendendo na maioria dos casos a valores negativos (côncavos), como áreas que já sofreram escorregamentos, ou seja, maior propensão ao risco.

Uma correlação importante a ser citada é sobre a qualidade do maciço, suscetibilidade ao escorregamento não está ligada apenas a geometria do terreno, mas sim a resistência ao cisalhamento dele. Dessa forma, a análise abrange dentro dos valores indicados como mais suscetíveis zonas menos resistentes que resultam em movimentos de massa.

## **7. CONCLUSÕES**

A partir dos dados analisados, pode-se concluir que em relação à declividade, que existe uma correlação direta de quanto maior a declividade, maior a suscetibilidade a escorregamentos. Inferiu-se alguns valores de quebra, onde, por exemplo, declividades abaixo de 5° não apresentam influência na suscetibilidade a escorregamentos, declividades abaixo de 17°, adotadas na Lei Lehmann de parcelamento do solo, apresentando-se de fato como uma classe de baixa suscetibilidade.

Constata-se que embora os setores de risco baixo (R1) e médio (R2) apresentem-se similares do ponto de vista do meio físico, a quebra inferida em 21° de declividade, pode estar relacionada a uma correlação com a geometria do talude, onde acima dessa declividade é sugerida a presença de geometria para a ocorrência de deslizamentos. Sendo assim, é uma variável confiável para a análise de suscetibilidade a escorregamentos.

Em relação a curvatura, conclui-se que para determinar um intervalo de valores que representem a curvatura vertical retilínea o método aplicado não foi completamente satisfatório, onde o mapeamento de campo, pode ter sido responsável pelo resultado deficiente.

A partir dos dados de curvatura vertical mínima obtidos entende-se uma correlação de quanto menor índice de curvatura maior a suscetibilidade a deslizamentos. Para os dados de curvatura vertical máxima, constatou-se uma correlação de quanto maior índice de curvatura maior a suscetibilidade a escorregamentos. Onde essa tendência demonstra que a curvatura vertical pode ser aplicada como um indicador da competência geotécnica, dessa forma é um bom índice de análise de suscetibilidade a escorregamentos.

Por fim, adverte-se sobre a falta de literaturas sobre a influência da curvatura vertical na suscetibilidade a escorregamentos. O trabalho realizado pode ser utilizado como inspiração para estudos mais aprofundados na área.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Almeida, F. F. M. de., 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, v. 41, n. 3, p. 9–75.  
Almeida V.V., Guerra G.I.T., Oliveira A.A., Marques I.P., Loreti-Junior R., Ribeiro L.M.A.L.,

- Azevedo E.J.H.C.B.P. Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo. Mapa. São Paulo: CPRM, 2019, 1 mapa colorido. Escala 1:250.000. Projeto Materiais de Construção na Região Metropolitana de São Paulo
- Augusto Filho, O., 1992, Caracterização geológica-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica, In Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro: ABMS/ ABGE/ PCRJ, 1992. v.2, p.721-33.
- BRASIL (MCIDADES – MINISTÉRIO DAS CIDADES, IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO). Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. CARVALHO, C.S.; MACEDO, E.S; OGURA, A.T. (orgs.), Brasília, 2007.
- Canil, K., Freitas, C. G. L., Sobreira, F. G., Collares, E. G., 2018, Cartografia Geotécnica e Geoambiental. Geologia de Engenharia e Ambiental. 1ed. São Paulo: ABGE, v. 2, p. 421-437, 2018.
- Castro, A. L. C., 1998, Glossário de defesa civil: estudo de riscos e de medicina de desastres. Brasília: MPO/Departamento de Defesa Civil.
- Cerri, L.E. da S. & Amaral, C., 1998, Riscos Geológicos, In: Oliveira, A.M dos S., Brito, S.N. (organizadores), Geologia de Engenharia, São Paulo, ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia), p. 301-310.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J., 1996, Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3 – Landslide types and processes, In: Transportation research board special report, n. 247.
- Dias, H.C., Hölbling, D., Grohmann, C.H., 2021a, Landslide susceptibility Mapping in Brazil: A Review. *Geosciences* 2021, 11, 425, <https://doi.org/10.3390/geosciences11100425>
- Dias, H.C., Gramani, M.F., Grohmann, C.H., Bateira, C., Vieira, B.C., 2021b, Statistical-based shallow landslide susceptibility assessment for a tropical environment: a case study in the southeastern Brazilian coast, *Nat. Hazards* 2021, doi:10.1007/s11069-021 04676-y.
- Defesa Civil do Espírito Santo, 2020, Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE)., <https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Publicacoes/Simbologia%20dos%20Desastres.pdf>. (acessado em: abril 2023).
- Ferreira, C. J. & Rossini-Penteado, D., 2011, Mapeamento de risco a escorregamento e inundação por meio da abordagem quantitativa da paisagem em escala regional, xiii Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Anais, São Paulo.
- Florenzano, T. G. Introdução à geomorfologia. In: Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de textos, 2008. p. 11-30.
- Florinsky, I. V. An illustrated introduction to general geomorphometry. 2017. *Progress in Physical Geography*, 41(6), 723-752.
- Guth, P. L., & Geoffroy, T. M., 2021, LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. *Transactions in GIS*, 2245–2261. <https://doi.org/10.1111/tgis.12825>.
- Guth, P. L., et al., 2021, Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. *Remote Sensing*, 13(18), 3581. <https://doi.org/10.3390/rs13183581>.
- Guzzetti, F.; Mondini, A.C.; Cardinali, M.; Fiorucci, F.; Santangelo, M.; Chang, K.T. 2012. Landslide inventory maps: New tools for a old problem. *Earth-Sci. Rev.* 2012, 112, 42–66.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Serviço Geológico do Brasil, 2014, Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação do Município de Guarujá – SP, escala 1:25.000. São Paulo: IPT/CPRM, 2014
- Instituto Geológico, 2020, Mapeamento de Riscos de Movimentos de Massa e Inundações do Município de Francisco Morato: Relatório Técnico. São Paulo, 2020.
- Instituto Geológico, 2020, Mapeamento de Riscos de Movimentos de Massa e Inundações do Município de Mauá (2020): Relatório Técnico. São Paulo, 2020.
- Juliani, C. et al., 2014, Mapa geológico da Folha Atibaia (SF.23-Y-C-III), noroeste da cidade de São Paulo, SP, Anais, Salvador: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2014. p. 1822, <http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44> (acesso em 15 abril 2023).
- Lindsay, J.B. 2014. The Whitebox Geospatial Analysis.Tools project and open-access GIS, Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, 16-18 April, DOI: 10.13140/RG.2.1.1010.8962.
- Lucchese, L.V., de Oliveira, G.G.; Pedrollo, O.C., 2021, Mamdani fuzzy inference systems and artificial neural networks for landslide susceptibility mapping, *Natural Hazards* 2021, 106,

- 2381–2405, doi:10.1007/s11069-021-04547-6.
- Macedo, E. S. de, Sandre, L. H., 2022, Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022, *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v.12, n.1, p.110-117.
- Meirelles, E.D.O., Dourado, F., Costa, V.C.D., 2018, Análise multicritério para mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do Rio Paqueta-RJ. *GEO UERJ* 2018, doi:10.12957/geouerj.2018.26037.
- Moraes Rego, L. F., 1933, Contribuição ao Estudo das Formações Pré-devoneanas de São Paulo. [s.l.] Editora / Instituto Astronomico e Geographico de S. Paulo.
- Ohlmacher, G.C., 2007. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Eng. Geol.* 91 (2-4), 117-134.
- Perrotta, M.M., et al. 2005. Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo. CPRM, São Paulo, SP.
- Ponçano, W.L.; Carneiro, C.D.R.; Bistrichi, C.A.; Almeida, F.F.M. de.; Prandini, F.L. .1981. Notícia Explicativa do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT. 94p. (IPT, Monografias 5).
- QGIS Development Team, 2023, QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, <http://qgis.osgeo.org>
- Ross, J. L. S., & Moroz, I. C., 2011, Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. *Revista Do Departamento De Geografia*, 10, 41-58, <https://doi.org/10.7154/RDG.1996.0010.0004>.
- Silva, P. C. S. da.1992. O Complexo Embu na porção sudeste da folha Mauá (SF-23-Y-D-IV-1). Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-26102015-131100/pt-br.php>. Acesso em: 03 ago. 2023.
- Strobl, P., 2020, The new Copernicus digital elevation model. *GSICS Quarterly*, 14(1). <https://doi.org/10.25923/enp8-6w06>.
- UN-ISDR - United Nations. International Strategy for Disaster Risk Reduction (UNISDR). UNISDR terminology on disaster risk reduction. Geneva: UNISDR; 2009. Disponível em: <2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction - World | ReliefWeb>. Acesso em: 10 de jun. de 2023.
- Valeriano, M. M. 2003. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.3, p.539-546.
- Valeriano, M. M. 2008. TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São Jose dos Campos: INPE.
- Vedovello, R., 2000, Zoneamento geotécnicos aplicados a gestão ambiental, a partir de Unidades Básicas de Compartimentação - UBSS. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista-UNESP, 2000.
- Veloso, A. J. G. Importância do Estudo das Vertentes. *GEOgraphia*. v.8, n.8, 2002
- Zêzere JL, Oliveira SC, Garcia RAC, Reis E. 2007. Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements. *Landslides* 4(2):123–136.